



Pro gradu -tutkielma  
Meteorologia

# **MERISÄÄASEMIEN TUULIHAVAINTOJEN VERTAILU SKATTEROMETRILLÄ MÄÄRITETTYYN 10 METRIN PINTATUULEEN**

Hadassa Hovestadt  
19. maaliskuuta 2018

Ohjaajat: Dos. Hilppa Gregow  
FT Teresa Valkonen  
Tarkastajat: Prof. Heikki Järvinen  
Dos. Hilppa Gregow

HELSINGIN YLIOPISTO  
MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA

PL 64 (Gustaf Hållstromin katu 2)  
00014 Helsingin yliopisto



HELSINGIN YLIOPISTO  
HELSINGFORS UNIVERSITET  
UNIVERSITY OF HELSINKI

MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA  
MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN  
FACULTY OF SCIENCE

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Matemaattis-luonnontieteellinen tdk		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree programme Meteorologia	
Tekijä – Författare – Author Hadassa Hovestadt			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Merisääsämien tuulihavaintojen vertailu skatterometrillä määritettyyn 10 metrin pintatuuleen			
Työn laji – Arbetets art – Level Pro Gradu -tutkielma		Aika – Datum – Month and year Maaliskuu 2018	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 56 s. + liitteet 4 s.
Tiivistelmä – Referat – Abstract <p>Merenpinnalla vallitseva tuuli on keskeinen tieto merenkulkijoille, mutta tuulihavaintoja on harvoin saatavilla läheltä pintaa. Merisääsämien tuulimittarit ovat havaintopaikasta riippuen sijoitettu 14–55 metrin korkeuteen majakoiden huipulle. Mittari sijaitsee tyypillisesti maksimissaan yhden metrin korkeudella helikopterilustasta. Tuuli eroaa usein sekä nopeuden että suunnan suhteen pintatuulesta. Kuitenkin merenkulkijoille pintatuuli on monesti merkityksellisempi tieto kuin korkealta majakan katolta tehty tuulihavainto.</p> <p>Tutkimuksessa selvitettiin kuinka hyvin merelliset majakkahavainnot edustavat 10 metrin korkeudella vallitsevaa tuulta. Vuosien 2012–2017 ajalta tutkittiin neljän eri merellisen majakan tuulioloja. Aineistoon kuuluivat Kemi I majakka, Raahen Nahkiainen, Kristiinankaupungin majakka ja Porvoon Kalbådagrund. Vertailukohtana käytettiin Euroopan satelliittijärjestön (EUMETSAT) ja OSI SAF -osaamiskeskuksen kehittämää ASCAT tuulituotetta, joka määrittää merenpinnan yllä 10 metrin korkeudella vallitsevan tuulen neutraalissa ilmakehässä.</p> <p>Majakan tuulihavainnon nopeutta ja suuntaa tarkasteltiin erikseen tässä tutkimuksessa. Sekä tuulen nopeudelle että suunnalle laskettiin absoluuttinen keskivirhe (MAE), keskineliövirheen neliöjuuri (RMSE) ja keskivirhe (ME). Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin erikseen vaikuttaako vuodenaika, tuulen nopeus tai suunta tuloksiin. Vastaavanlaista tutkimusta Suomen merisääsämien tuulihavainnoista ei ole aikaisemmin toteutettu.</p> <p>Tämän tutkimuksen perusteella majakan tuulennopeudella on maltillinen positiivinen harha 10 metrin pintatuuleen verrattuna. Syksyllä ero on pienempi kuin keväällä, todennäköisesti vuodenaikajäljen vuorokauden vuoksi. Tuulennopeuden ollessa kohtalainen tai navakka havainto edustaa pintatuulta paremmin kuin jos tuulennopeus on heikko tai kova. Heikolla tuulella majakkahavainto aliarvioi 10 metrin korkeudella vallitsevaa tuulta, mutta tuulennopeuden kasvaessa kohtalaiseksi tai siitä voimakkaammaksi majakkahavainto yliarvioi pintatuulta. Pientä signaalia on nähtävillä siitä, että majakan havainnoissa tuulensuunta on kääntynyt vastapäivään pintatuuleen verrattuna.</p> <p>Jatkotutkimuksia varten majakkapisteitä tarvitaan lisää, ja rannikon läheltä tehtyihin tuulihavaintoihin on käytettävä sopivaa vertailukohtaa. ASCAT tuulituote on hyvä väline avomerellä pintatuulen määrittämiseen, mutta tämän hetken skatterometrimenetelmillä ei ole mahdollista määrittää tuulta aivan rannikon läheisyydestä. Jatkotutkimuksia varten on siis saatava esimerkiksi masto- tai poijumittauksia tuulesta.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Tuuli, säähavainnot, satelliitti, skatterometri, ASCAT, majakka, uusanalyysi, verifiointi			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Kumpulan tiedekirjasto, Helsingin yliopisto			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			



HELSINGIN YLIOPISTO  
HELSINGFORS UNIVERSITET  
UNIVERSITY OF HELSINKI

MATEMAATTIS-LUONNONTIEDELLINEN TIEDEKUNTA  
MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN  
FACULTY OF SCIENCE

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Faculty of Science		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree programme Meteorology	
Tekijä – Författare – Author Hadassa Hovestadt			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Assessing the adequacy of marine weather station wind observations for predicting the 10 meter surface winds observed by scatterometers			
Työn laji – Arbetets art – Level Master's thesis	Aika – Datum – Month and year March 2018	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 56 p. + appendices 4 p.	
<b>Tiivistelmä – Referat – Abstract</b> <p>Surface winds are crucial information for seafarers, however, in Finland, marine weather station measurements have never had their observations verified in order to define surface winds. The wind measurement instruments of marine weather stations are located on top of the lighthouses at a height of 14-55 meters. The instrument is typically located on the helicopter platform or close to it, and is therefore cannot usually be higher than one meter above it. The wind measured at this height often differs from the surface wind, both in speed and direction. However, for seafarers, the surface wind information is often more relevant than the wind observation from the much higher lighthouse roof.</p> <p>This study investigated how well the marine lighthouse observations represents the sea surface wind at 10 meters. Between the years of 2012 to 2017, the wind conditions from four different marine lighthouses were studied: Kemi I lighthouse, Raahe Nahkiainen, Kristiinankaupunki lighthouse and Porvoo Kalbådagrund. The wind benchmark used was the ASCAT wind product, developed by the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) and the Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility (OSI SAF), which determines wind at 10 meters above the sea surface in a neutral atmosphere.</p> <p>The difference between the lighthouse observations and the benchmark were examined by calculating the mean absolute error (MAE), the root mean squared error (RMSE), and the mean error (ME). In addition the season, wind speed, and wind direction were evaluated for their effects on the results. Similar research for wind observations by marine weather stations have never previously been carried out in Finland.</p> <p>This studied shows that the wind speed measured from the lighthouse has a moderate positive bias compared to the 10 meter surface wind. In the autumn this bias is reduced compared to spring, this is likely due to the average seasonal variation in atmospheric hydrostatic stability. The lighthouse observations are more representative of surface winds when the wind speed is moderate to strong (as defined on the Beaufort scale), then when the wind speeds are weak or gale. With weak wind speeds the lighthouse is underestimating the surface wind, but when the wind speed increases to moderate or more, the lighthouse observation overestimates the surface wind. Lighthouse observations have a wind direction, which is counter clockwise to the surface wind, however, there is high uncertainty in this result.</p> <p>For further studies, more lighthouses are needed, and a suitable benchmark for observations close to the coast should be used. The ASCAT wind product is a good tool for defining surface water on the open sea, but at present scatterometers cannot determine the wind adjacent to the coast line. For further studies; mast or buoy measurements of the wind would be instrumental for assessing lighthouse observations.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Wind, weather observations, satellite, scatterometer, ASCAT, lighthouse, reanalysis, verification			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Kumpula Campus Library, University of Helsinki			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

# Lyhenteet

ASCAT	Advanced SCATterometer – Skatterometri
CMOD5.N	<i>C</i> -band geophysical model function for equivalent neutral wind
ECMWF	European Centre of Medium-Range Weather Forecasts – Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskus
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites – Euroopan satelliittijärjestö
GMF	Geophysical Model Function – Geofysikaalinen mallifunktio
KNMI	Royal Netherlands Meteorological Institute – Alankomaiden Meteorologinen laitos
LKB	Liu, Katsaros and Businger
MAE	Mean Absolute Error – Absoluuttinen keskivirhe
ME	Mean Error – Keskivirhe
MetOp	Meteorological Operational Polar satellite series
OSI SAF	Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility
QC flag	Quality Control flag – Laatukontrollilippu
RMSE	Root Mean Squared Error – Keskineliövirheen neliöjuuri
SST	Sea Surface Temperature – Meren pintalämpötila
UTC	Coordinated Universal Time – Yleisaika
WMO	World Meteorological Organization – Maailman ilmatieteen järjestö
WVC	Wind Vector Cell – Tuulivektorisolu



# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Tuulihavaintojen teoriaa</b>	<b>5</b>
2.1	Ilmatieteen laitoksen merisäähavainnot . . . . .	6
2.2	Skatterometrihavainnot . . . . .	8
2.2.1	ASCAT skatterometrin taustaa . . . . .	9
2.3	Uusanalyysi . . . . .	11
2.4	Stabiilisuus . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Tutkimusaineisto</b>	<b>15</b>
3.1	Majakkahavainnot . . . . .	15
3.1.1	Kemi I . . . . .	16
3.1.2	Raahen Nahkiainen . . . . .	18
3.1.3	Kristiinankaupungin majakka . . . . .	19
3.1.4	Porvoon Kalbådagrund . . . . .	20
3.1.5	Anemometri . . . . .	21
3.2	EUMETSAT ASCAT tuulituotteet . . . . .	22
3.2.1	EUMETSAT ASCAT rannikko-optimoitu tuu- lituote . . . . .	23
3.3	ERA5 uusanalyysi . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Aineiston analysointimenetelmät</b>	<b>28</b>
4.1	Aineiston rajaus . . . . .	28
4.2	Aineiston käsittely ja vertailu . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Tulokset</b>	<b>36</b>
5.1	Tuulen nopeus . . . . .	36

5.2	Tuulen suunta . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Johtopäätökset</b>	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>51</b>
	<b>Kiitokset</b>	<b>53</b>
	<b>Viitteet</b>	<b>54</b>
	<b>Liitteet</b>	<b>58</b>

# 1 Johdanto

Tuulimittarit ovat sijoitettu Suomen merialueilla havaintopaikasta riippuen 14 metristä 55 metrin korkeudelle. Tyypillisesti mittari on 25–35 metrin korkeudella ja keskimäärin havaintokorkeus on Suomenlahdella 10 metriä korkeampi kuin muilla merialueilla. Merialueilla majakoiden tuulimittarit ovat usein sijoitettu majakan huipulle. Tuuli majakan huipulla eroaa usein sekä nopeuden että tuulensuunnan suhteen 0 metrin korkeudella vallitsevasta tuulesta, ja majakka itsessään aiheuttaa häiriöitä esteettömästi puhaltavaan tuuleen.

Skatterometri on satelliitti-instrumentti, jonka tuottamien mittausten perusteella voidaan arvioida vedenpinnan väreilystä tuulen suunta ja nopeus merialueilla. Tutkimuksen tarkoituksena on ollut selvittää satelliittien skatterometrihavaintojen avulla kuinka paljon majakoiden tuulihavainnot merialueilla eroavat 10 metrissä vallitsevasta pintatuulesta. Samalta ajalta on tarkasteltu siis majakahavaintoa ja skatterometrihavaintoa tuulesta ja niitä on vertailtu keskenään.

Koska käytettävät skatterometrihavainnot edustavat tuulta neutraalissa ilmakehässä, ovat kaikki havainnot valittu ajanjaksoilta, jolloin stabiilisuus on neutraali. Skatterometrihavaintojen avulla on mahdollista määrittää tuulta ainoastaan avomereltä, joten rannikolta ja saaristoalueilta ei ole saatavilla havaintoja. Merialueiden majakat taas lähes kaikki ovat suhteellisen lähellä rannikkoa tai saaristoa. Tutkimus on toteutettu siten, että merellisistä majakoista aineistoon on valittu tarpeeksi kaukana avomerellä sijaitsevat majakat. Aineistoon on valikoitunut neljä majakkaa: Kemi I majakka, Raahen

Nahkiainen, Kristiinankaupungin majakka ja Porvoon Kalbådagrund.

Skatterometrin tuulihavainto perustuu tuulen synnyttämän vedenpinnan väreilyn vaikutukseen tutkapulssin takaisinsirontaan. Skatterometrit määrittävät tutkapulssin takaisinsironnasta geofysikaalisen mallifunktion (GMF) avulla 10 metrin korkeudella vallitsevan tuulen.

Merisääsämien tuulihavainnot ovat Ilmatieteen laitoksen havaintotietokannasta. Skatterometrihavainnot on saatu Euroopan satelliittijärjestön (EUMETSAT) ja OSI SAF -osaamiskeskuksen kehittämästä tuulituotteesta. ERA5 uusanalyysistä on saatu meren pintalämpötila (SST) stabiilisuuden määrittämistä varten.

Majakoiden tuulihavainnot eivät juuri ole olleet tutkimuksen kohteena. Samankaltaista aihetta on tutkinut esimerkiksi Suomi (2017), joka väitöskirjatyössään on kehittänyt uusia menetelmiä tuulen puuskien ennustamiseen ja mittaamiseen. Suomen tuuliatlaksen<sup>1</sup> teon yhteydessä Ilmatieteen laitos on tehnyt monenlaista tutkimusta Suomen tuulioloista, mutta varsinaisesti tuulihavaintojen verifiointia ei ole toteutettu. Myöskään muualla maailmalla aiheen ympäriltä ei löydy juurikaan tutkimuksia. Rajakerrosteorian pohjalta voidaan kuitenkin odottaa tuulen voimistuvan ylöspäin mennessä logaritmisen tuulilain pohjalta ja suunnan kääntyvän myötäpäivään Ekman-spiraalin vuoksi.

Tämä työ sai rahoituksensa Suomen Akatemian rahoittamasta CLIPS-kärkihankkeesta (CLImate services supporting Public activities and Safety). Tutkielmasta hyötyvät purjehtijat ja muut merenkulkijat Suomen merialueilla, sekä Ilmatieteen laitoksen havaintopalvelu.

---

<sup>1</sup>Suomen tuuliatlas -sivusto löydettävissä osoitteessa: <http://www.tuuliatlas.fi>

## 2 Tuulihavaintojen teoriaa

Tuuli on yksi säähavaintosuure, jota mitataan säähavaintoasemilla. Tuulen mittaamisessa noudatetaan Maailman ilmatieteen järjestön (WMO) standardeja. Tuulensuunta ja -nopeus mitataan noin 10 metriä pinnan esteiden yläpuolelta (Ilmatieteen laitos, 2017b). Tuulihavainto tehdään siten vähintään 10 metrin korkeudelta ja joskus tilanteen vaatiessa mittauskorkeus on usean kymmenen metrin korkeudella.

Tuuli luokitellaan nopeuden perusteella taulukon 1 mukaisiin tuuliluokkiin. Luokittelu perustuu alun perin boforiasteikkoon (Frisk, 2017). Tuulta mitataan 10 minuutin keskiarvona, jolloin yksittäiset puuskat tasoittuvat (Ilmatieteen laitos, 2018b). Tuulen suunta tarkoittaa sitä suuntaa, josta tuuli puhaltaa.

Seuraavaksi tässä luvussa esitellään Ilmatieteen laitoksen merisäähavaintojen ja skatterometrihavaintojen taustalla olevaa teoriaa sekä ilmakehän hydrostaattisen stabiilisuuden määrittämistä.

**Taulukko 1:** *Tuuliasteikko 10 minuutin keskituulelle (Ilmatieteen laitos, 2018b; Frisk, 2017).*

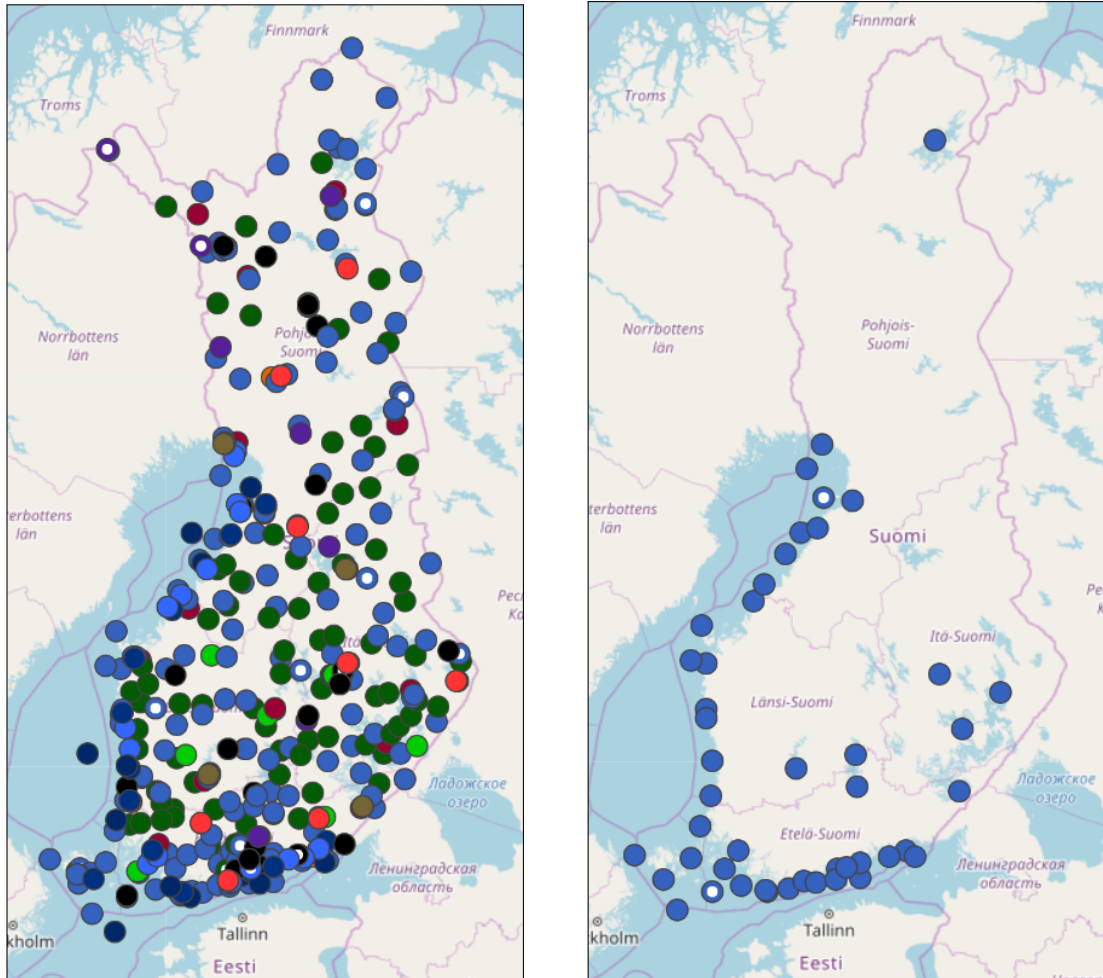
0,0–0,2 m/s	tyyni
0,3–3,3 m/s	heikko tuuli
3,4–7,9 m/s	kohtalainen tuuli
8,0–13,8 m/s	navakka tuuli
13,9–20,7 m/s	kova tuuli
20,8–32,6 m/s	myrsky
yli 32,6 m/s	hirmumyrsky

## 2.1 Ilmatieteen laitoksen merisäähavainnot

Ilmatieteen laitos tekee säähavaintoja maalla, järvillä, rannikolla ja merellä. Tällä hetkellä Ilmatieteen laitoksella on yhteensä noin 400 havaintoasemaa Suomessa ja Itämerellä (kuva 1), joista rannikkosääasemia on noin 50 (Ilmatieteen laitos, 2017d; Ilmatieteen laitos, 2017c). Rannikkosääasemiin luetaan ne havaintoasemat, jotka tekevät havaintoja rannikolta, mereltä tai järveltä (Frisk, 2017). Rannikkosääasema on hieman harhaanjohtava nimitys avomerellä, joten näitä asemia kutsutaan myös merisääasemiksi. Merisääasemat mittaavat merellisiä olosuhteita vähintään yhdeltä tuulensuunnan sektorilta. Tuulihavainto on näillä asemilla oleellisin sääparametri etenkin turvallisuuden kannalta. Lisäksi merisääasemiksi luetaan myös järvisääasemat sen nojalla, että ne edustavat vesistöympäristöä.

Merellä kulkuyhteydet havaintoasemalle ovat vaikeat ja asutetut alueet kaukana, ja siksi merisääasemia on Suomessa 1970-luvun loppupuolella ensimmäisenä lähdetty automatisoimaan (Ilmatieteen laitos, 2017e). Automatisoinnin tavoitteena on myös ollut saada havaintosuureita tiheämmällä aikavälillä, välittää säähavainnot reaaliajassa käyttäjille ja yhtenäistää sään havainnointia. Tällä hetkellä jo yli 90 %:a Suomen sääasemista on automatisoitu (Ilmatieteen laitos, 2017a). Automaattinen sääasema vaatii sähköt sekä tietoliikenne- ja kulkuyhteydet huoltoa varten (Frisk, 2004). Mahdolliset sijoituspaikat ovat rajalliset ja usein havaintoasemat ovatkin sijoitettu ennestään sähköistettyihin paikkoihin, lähinnä majakoihin.

Tuulihavaintojen kannalta majakat ovat usein ongelmallisia (Frisk, 2004). Tuulimittaria ei voida sijoittaa 10 metrin korkeudelle, mikä on kansainvälisesti suositeltu referenssikorkeus, vaan se on



**Kuva 1:** Ilmatieteen laitoksen havaintoasemat (vasemmalla) ja rannikkosääasemat (oikealla). Väreillä kuvataan eri asematyyppejä, jotka ovat listattuna Ilmatieteen laitoksen havaintotietokannassa. Kuvat: Ilmatieteen laitos, 2017c.

sijoitettava majakan katolle, joka on joskus jopa monen kymmenen metrin korkeudessa. Katolle sijoitettaessa vaikeuksia tuottaa helikopterialusta, joka on usein merellisissä majakoissa välttämätön huolto- toimenpiteiden kannalta. Helikopterialustalle sijoitetut mittalaitteet voidaan asentaa vain noin yhden metrin korkeudelle, jotta turvallinen laskeutuminen on mahdollista. Näin lähelle alustaan sijoitettuun mittariin ilma ei pääse esteettömästi virtaamaan, vaan majakka ja helikopterialusta aiheuttavat häiriöitä tuuleen.

Jokaiselta automaattiasemalta saadaan havaintoja tällä hetkellä 10 minuutin välein (Ilmatieteen laitos, 2017e). Ilmatieteen laitok-

sen automaattinen laadunvalvonta tarkastaa jokaisen havaintoarvon ja testaa niiden luotettavuuden. Havaintolaitteiden diagnostiikkatietojen ja anturien sisäisten raja-arvojen avulla tehdään ensimmäinen laadunvarmistus. Havaintojen saapuessa havaintotietokantaan niiden laatu testataan uudelleen automaattisten testien avulla ja epäilyttävät havaintoarvot käydään vielä manuaalisesti läpi. Aineistossa käytetty Ilmatieteen laitoksen havaintoaineisto on käynyt läpi koko laadunvalvontaketjun.

## 2.2 Skatterometrihavainnot

Skatterometrit ovat kaukokartoitusvälineitä, jotka havainnoivat satelliitista käsin maan- ja merenpintaa (EUMeTrain, 2017). Instrumentti lähettää mikroaaltosäteilyä tutkapulssina ja vastaanottaa sen takaisinsirontaa ( $\sigma_0$ ), eli kyseessä on aktiivinen tutkainstrumentti. Pulssin siroamiseen vaikuttaa pääosin pinnan rosoisuus, josta puolestaan voidaan määrittää tuulen nopeus ja suunta meren yllä. Mitä suurempi on tuulen kitkanopeus, sen rosoisempi on merenpinta ja sen enemmän tutkapulssi siroaa (kuva 2). Koska skatterometri määrittää tuulen vedenpinnan väreilystä, eivät laajat vuorovesiaallot tai vanhat mainingit vaikuta tuulihavaintoon.

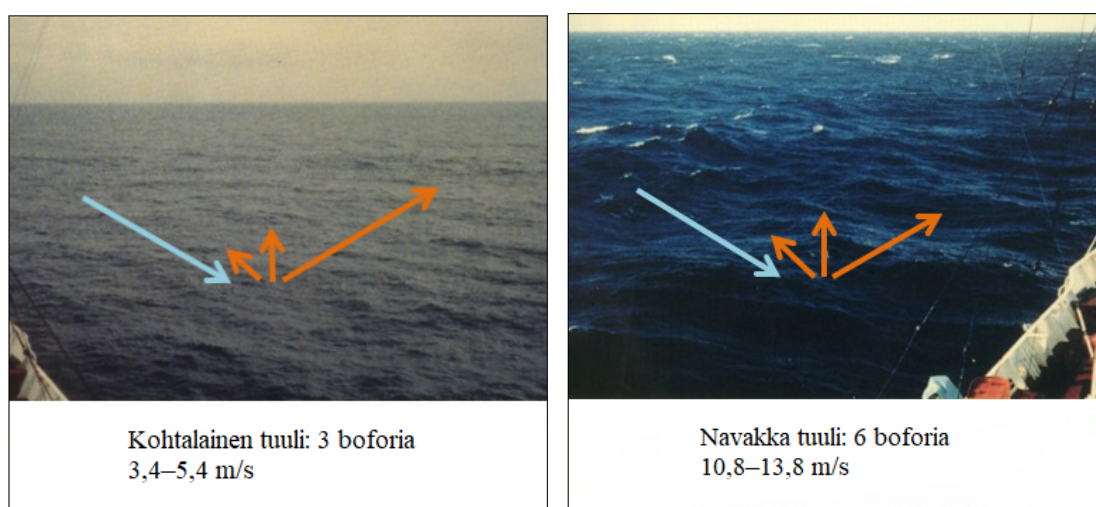
Havaittu takaisinsironta muutetaan geofysikaalisen mallifunktion (GMF) avulla vastaamaan tuulen nopeutta 10 metrin korkeudessa (EUMeTrain, 2017). Muunnos 10 metrin korkeudelle tehdään niin sanotun LKB-mallin (Liu, Katsaros and Businger) avulla (W. T. Liu, 1979). Skatterometrin lähettämä mikromaallon taajuus on joko  $C$ -kaistalla (5,255 GHz) tai  $K_u$ -kaistalla (13,4 GHz).  $K_u$ -kaista on herkkä sateelle, toisin kuin  $C$ -kaista.



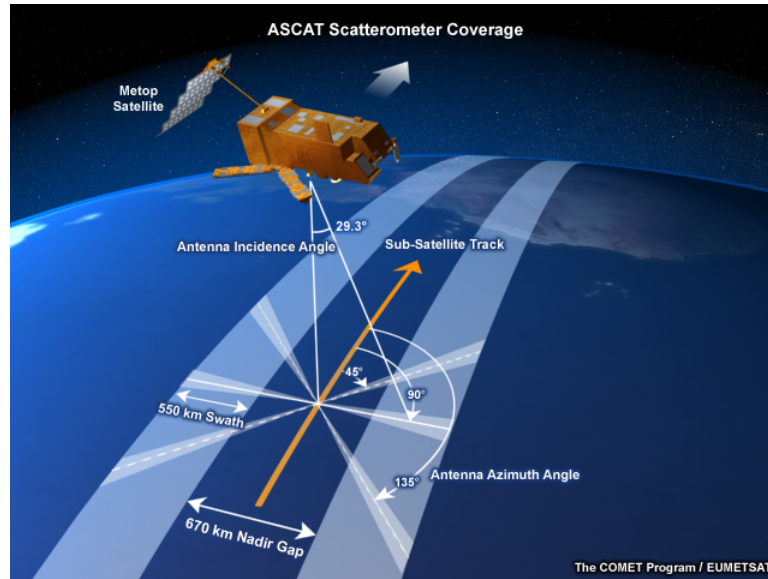
### 2.2.1 ASCAT skatterometrin taustaa

ASCAT (Advanced SCATterometer) skatterometri on MetOp-satelliiteissa mukana oleva *C*-kaistalla toimiva instrumentti (EUMETSAT, 2015). ASCAT käyttää takaisinsironnan käsittelyssä osittain empiiristä geofysikaalista mallifunktiota nimeltä CMOD5.N (*C*-band geophysical model function for equivalent neutral wind), joka on kehitetty Euroopan satelliittijärjestön (EUMETSAT) ja Alankomaiden meteorologinen laitoksen (KNMI) toimesta (Verspeek et al., 2012). Mallifunktio muuntaa takaisinsirontatiedon vastaamaan 10 metrin korkeudella virtaavaa neutraalin ilmakehän tuulta.

Instrumentti koostuu kolmesta antennista, jotka ovat suunnattu  $45^\circ$  eteenpäin, suoraan sivulle ja  $45^\circ$  taaksepäin molemmin puolin satelliittia sen kulkusuuntaan nähden, kuten kuvasta 3 nähdään (OSI SAF, 2016). Satelliitin kulkiessa alueen yli se kerää havaintoja kahdelta 550 kilometrin levyiseltä kaistaleelta. Väliin jäävältä 670 kilometrin kaistaleelta ei saada havaintoja. Molemmat 550 kilometrin kaistat jaetaan vielä pienempiin tuulivektorisoluihin (WVC), joiden



**Kuva 2:** Havainnekuva tutkapulssin siroamisesta merenpinnasta kahdella eri tuulen voimakkuudella. Kuvat: EUMeTrain, 2017.

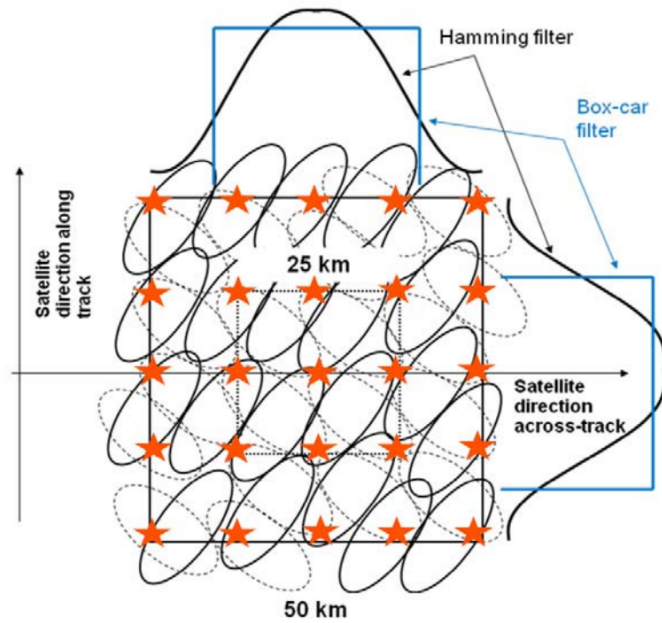


**Kuva 3:** ASCAT skatterometrin havaitsema alue MetOp-satelliitin kiertoradalta. Kuvassa näkyy ASCAT instrumentin antennien suunnat. Kuva: EUMETSAT.

säde on joko 25 tai 12,5 kilometriä. Tuulivektorisolun takaisinsironta keskiarvoistetaan ja sen pohjalta määritetään tuulivektorisolun keskimääräinen tuuli.

Takaisinsironnan keräämistä havainnollistaa kuva 4. Oranssit tähdet merkitsevät tuulivektorisolujen keskipisteitä, joita on kuvassa 12,5 kilometrin välein (EUMETSAT, 2015). ASCAT 25 kilometrin tuulituotteessa etäisyydet ovat kaksinkertaiset. Tuulivektorisolut ovat todellisuudessa ympyrän mallisia ja ne ovat osittain päällekkäin toistensa kanssa. Ellipsin muotoiset alueet ovat tutkakeiloja, joita on tässä esitetty yksinkertaisuuden vuoksi vain kahdessa suunnassa (EUMETSAT, 2015; OSI SAF, 2016).

Takaisinsironnan keskiarvoistaminen tehdään joko Hammingin ikkunan (Hamming filter) tai yksinkertaisen laatikkosuodattimen (Boxcar filter) avulla (EUMETSAT, 2015; OSI SAF, 2016). Kuvassa 4 on havainnollistettu Hammingin ikkuna -menetelmän takaisinsironnan painotus mustalla paksulla viivalla ja laatikkosuodattamismene-



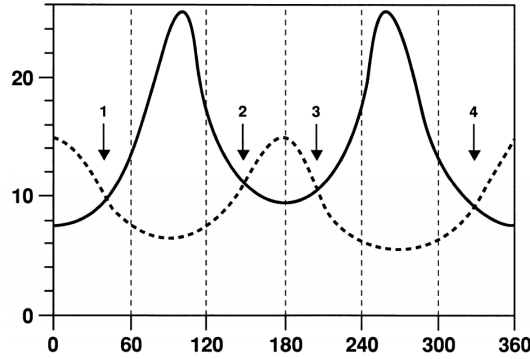
**Kuva 4:** Takaisinsironnan keräämisen havainnollistaminen ASCAT 12,5 kilometrin tuulituotteessa. Kuva: EUMETSAT, 2015.

telmän painotus sinisellä paksulla viivalla. Hammingin ikkuna käyttää takaisinsironnan havaintoja laajemmalla alueella kuin laatikkosuodatin ja siten ei saa esimerkiksi kovin läheltä rannikkoa tuulihavaintoja.

Tuulivektorin suunta ei määräydy yksiselitteisesti takaisinsironnan ja GMF:n avulla (Verhoef ja Stoffelen, 2017; Stoffelen, 1998). Tämä johtuu sakkofunktion minimoinnin tuloksena syntyneistä useista tuulen suunnan todennäköisistä ratkaisuksista, joita havainnollistaa kuva 5. Yleensä tuulen suunnalle tulee kaksi yhtä todennäköistä ratkaisua, jotka eroavat toisistaan  $180^\circ$ :lla. Todennäköisin vaihtoehto valitaan meteorologisten analyysien avulla (EUMETSAT, 2015).

## 2.3 Uusanalyysi

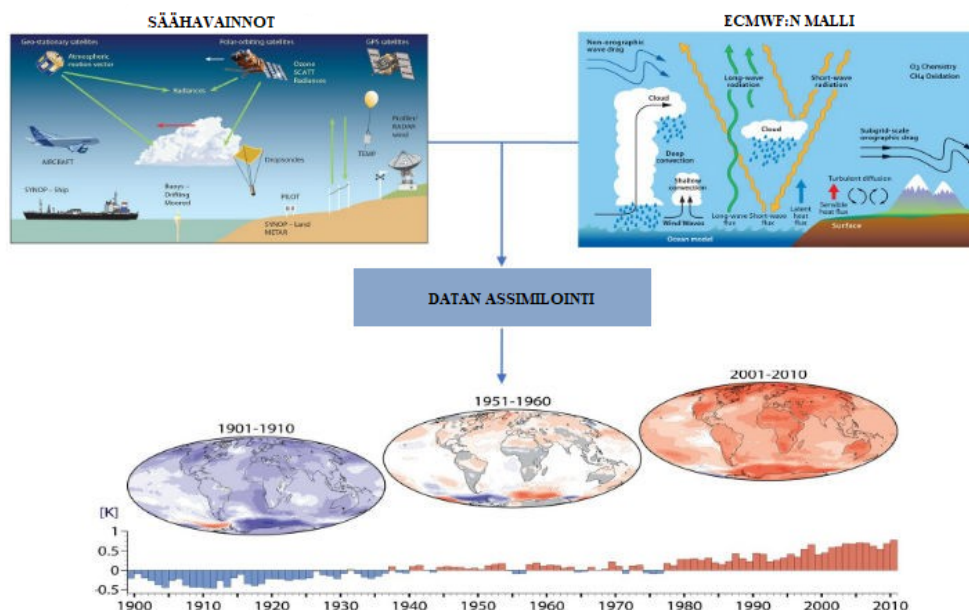
Uusanalyysissä on yhdistettynä sekä säämalli- että havaintoaineistoa tarjoten siten parhaan arvion ilmakehän vallinneesta tilasta (Karttunen, 2008; Hersbach ja Dee, 2016). Havaintoja on saatavilla vain



**Kuva 5:** Tuulennopeus tuulensuunnan funktiona kahdelle eri mittaukselle. Kuvaajan käyrät esittävät mittausten mahdollisia ratkaisuja tuulelle. Nuolilla on kuvattu kohdat, joista mahdolliset ratkaisut tuulen nopeudelle ja suunnalle löytyvät. Kuva: Stoffelen, 1998.

rajoitetuista paikoista, ne ovat puutteellisia ja voivat olla virheellisiä. Sen takia havainnot yksinään eivät tarjoa parasta arviota ilmakehän tilasta, vaan tueksi tarvitaan ilmakehää kuvaavia malleja. Uusanalyysin perustana käytetään menneen ajanjakson numeerisen sääennustemallin arviota ilmakehän tilasta, jota viilataan paremmaksi saatavilla olevien havaintojen avulla. Havaintojen mukauttamista sääennustemalliin kutsutaan datan assimiloinniksi, jota havainnollistaa kuva 6. Tuloksena on uusanalyysi, joka arvioi ilmakehän mennyttä tilaa globaalisti. Havaintoina käytetään *in situ* -mittauksia, radioluotauksia, ja nykyään myös satelliittien radiometrien mittauksia.

Uusanalyysi pyrkii siis kuvaamaan menneen ilmakehän tilaa mahdollisimman oikein myös niissä pisteissä, joissa havaintoja ei ole saatavilla (Karttunen, 2008). Sen tuottamisella ei ole kiire, toisin kuin ennusteen tueksi tehdyllä analyysillä (Hersbach, 2017). Siten uusanalyysin tekemiseen voi käyttää enemmän aikaa, jolloin havaintojen laatua voidaan tarkastella ja tehdä mahdollisia harhankorjauksia. Uusanalyysin etuihin lukeutuvat myös sen pitkät yhtenäiset aikasarjat ja datan kattavuus koko maapallon yli (Karttunen, 2008).

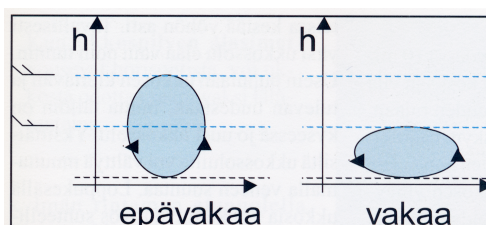


**Kuva 6:** Data-assimilaation periaate ilmaston uusanalyysissä kuvattuna. Kuva: ECMWF.

## 2.4 Stabiilisuus

Ilmakehän pystysuuntainen lämpötilajakauma määrittää ilmakehän stabiilisuuden (Karttunen, 2008). Epävakaassa eli labiilissa tilanteessa ilma sekoittuu syvässä kerroksessa ja vakaassa eli stabiilissa tilanteessa ilma ei juuri pystysuuntaisesti sekoitu (kuva 7).

Adiabaattinen lämpötilavähetä tarkoittaa ilmakehässä lämpötilan pystysuuntaista muutosta adiabaattisessa siirroksessa, jossa systeemiin ei tule eikä systeemi luovuta lämpöä ulkopuolelle (Puhakka, 1996). Potentiaalilämpötilan ollessa vakio kuiva-adiabaattinen lämpö-



**Kuva 7:** Skemaattinen kuva epävakaasta ja vakaasta tilanteesta ilmakehässä, jossa havainnollistetaan ilmakehän pystysuuntaista sekoittumista. Kuvassa  $h$  esittää pystysuuntaista korkeutta. Kuva: Frisk, 2004.

tilavähetete voidaan esittää seuraavasti:

$$-\frac{dT}{dz} \equiv \Gamma_d \approx \frac{g}{c_p}, \quad (1)$$

missä alaviite  $d$  viittaa kuivaan ilmaan,  $T$  on lämpötila,  $z$  on siiroksen korkeus,  $g$  on normaalikiikhtyvyys ja  $c_p$  on ilman ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa (Holton ja Hakim, 2013, s. 54). Kuiva-adiabaattista vähetettä käytetään, mikäli ilma ei ole kyllästetty vesihöyryllä. Kaava muuttuu hiukan, jos ilma on vesihöyryn kyllästämä:

$$-\frac{dT}{dz} \equiv \Gamma_s = \frac{g}{c_p} f(p, T), \quad (2)$$

missä alaviite  $s$  viittaa kosteaan ilmaan ja  $f(p, T)$  on paineen ja lämpötilan funktio, joka on esitetty lähdeaineistossa (Puhakka, 1996, s. 92).

Puhakan (1996) mukaan lämpötilavähetteen avulla voidaan todeta, onko ilmakehän hydrostaattinen tasapainotila vakaa, neutraali vai epävakaa. Mikäli lämpötilan muutos pystysuunnassa on suurempi (pienempi) kuin adiabaattinen lämpötilavähetete  $\Gamma$ , ilmakehä on hydrostaattisesti epävakaa (vakaa). Mikäli lämpötilan muutos on yhtä suuri adiabaattisen lämpötilavähetteen kanssa ilmakehä on hydrostaattisesti neutraali. Vesihöyryn kyllästymättömälle (kyllästämälle) ilmalle käytetään kuiva-adiabaattista (pseudoadiabaattista) lämpötilavähetettä  $\Gamma_d$  ( $\Gamma_s$ ).

## 3 Tutkimusaineisto

Tässä luvussa esitellään tutkimusaineisto. Luvun alussa esitellään tutkimuksessa käytetyt majakat, sitten ASCAT tuulituotteet ja lopuksi ERA5 uusanalyysi. Havaintoaineisto kattaa ajanjakson 12/2012–10/2017 pois lukien tammi- ja helmikuut, jolloin meri todennäköisimmin on jäässä, ja jolloin skatterometrituulta ei ole saatavilla. Havaintojakson pääasiallinen rajoite on ollut skatterometriaineiston saatavuus. Tätä työtä varten skatterometriaineistoa on saatu joulukuusta 2012 alkaen. ERA5 uusanalyysi taas tulee saataville kahden kuukauden viiveellä. Aineistoa onkin ladattu niin pitkälle kuin uusanalyysiä on saatu, eli 10/2017 asti.

### 3.1 Majakkahavainnot

Aineistossa käytetään neljän merellisen majakan tuulihavaintoja. Valikoidut majakat ovat Kemi I, Raahen Nahkiainen, Kristiinankaupungin majakka ja Porvoon Kalbådagrund. Kuvaan 8 on koottu majakkapisteen kartalle. Majakat ovat valittu siten, että ne edustavat avomerialosuhteita ja ettei lähistöltä löydy maa-alueita. Kaikissa aineiston majakoissa käytetään tuulimittarina kuppianemometria. Anemometreistä on kerrottu lisää kappaleessa 3.1.5.

Majakkahavaintoja puuttuu ajoittain rikkinäisen mittalaitteen tai muun syyn takia. Niistä majakoista, joissa on kaksi tuulimittaria, havaintoaineisto on otettu siitä mittarista, joka on toiminut virallisena mittarina. Pääsääntö on se, että virallinen mittari on #1-mittari, mutta tämän rikkoutuessa tilannetta paikkaa #2-mittari. Ensisijaisesti #1-mittariksi valitaan se, joka on katsottu toimivan vallitsevilla



**Kuva 8:** Aineistossa käytetyt majakat kartalla.

tuulensuunnilla paremmin (Frisk, 2017). Liitteessä B on esitetty tiedot virallisesta mittarista niistä majakoista, joissa on kaksi mittaria käytössä.

Majakkahavainnoista poimitut sääsuureet ovat tuulen nopeus, suunta ja lämpötila. Viimeksi mainittua käytetään apuna ilmakehän stabiilisuuden määrittämisessä, mistä kerrotaan tarkemmin luvussa 4.1.

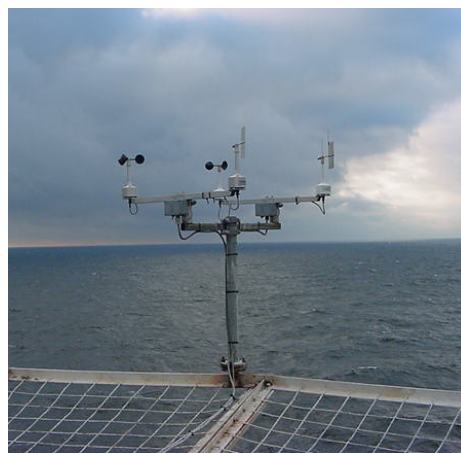
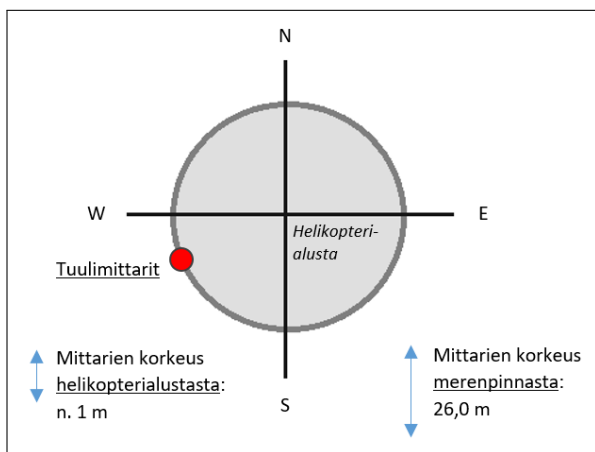
### 3.1.1 Kemi I

Perämeren Kemi I majakka sijaitsee avomerellä (Ilmatieteen laitos, 2017d). Lähin maa-alue sijaitsee noin 40 kilometrin etäisyydellä koillisessa. Tuuliantureita on kaksi ja ne sijaitsevat majakkatornin katolla helikopteritasolla, 26,0 metrin korkeudella merenpinnasta. Molemmat mittarit sijaitsevat helikopteritason suojaverkon länsilounaispäässä, noin 1 metrin korkeudella. Majakkarakennus on 25 metriä korkea. Idän ja koillisen suuntaisilla tuulilla tuulimittarit ovat katveessa. Kuva 9 on arkistokuva Kemi I majakasta ja kuvassa 10 on





**Kuva 9:** Arkistokuva Kemi I majakasta. Kuva: Ilmatieteen laitos, 2017c.



**Kuva 10:** Kemi I majakan tuulimittarit. Valokuva: Ilmatieteen laitos, 2017c.

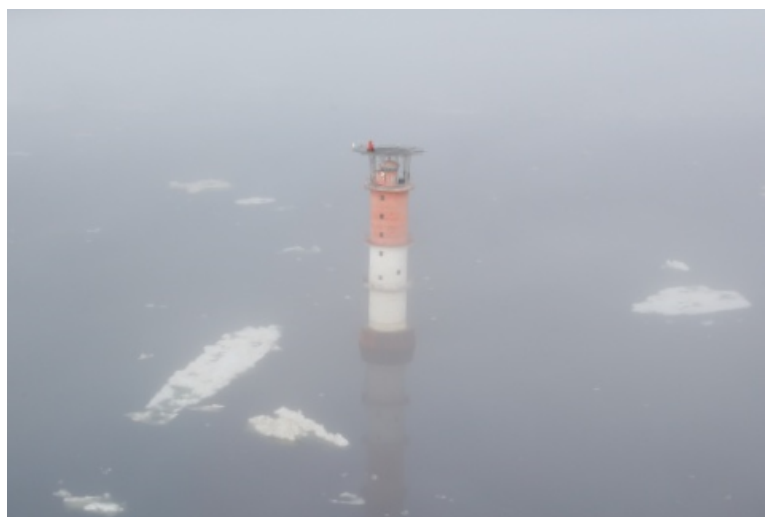
havainnollistettu tuulimittareiden sijoittelu.

Kemi I majakka on rakenteeltaan pohjamajakka (Laurell et al., 1999). Majakkatorni on valettu kiinni merenpohjaan upotetun betonisen jalustan, kasuunin päälle. Jalusta on 12 metrin syvyydessä. Kemi I majakka on Suomen ensimmäinen automaattinen säähavaintoasema. Sähkö tuotetaan nykyisin tuuligeneraattorin avulla. Majakka mittaa ilman lämpötilaa, kosteutta ja painetta sekä tuulen suuntaa ja nopeutta (Ilmatieteen laitos, 2017d).

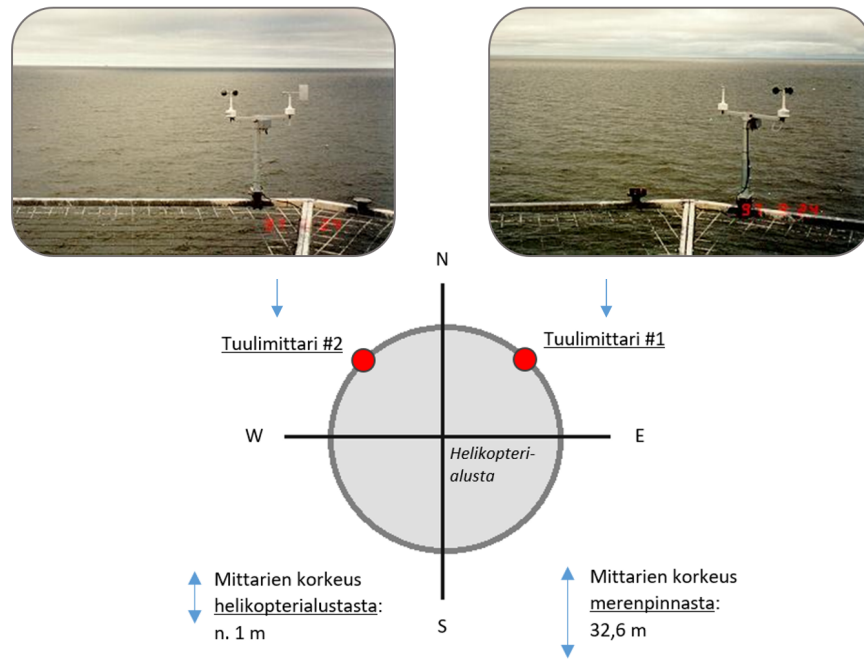
### 3.1.2 Raahen Nahkiainen

Raahen edustalla Perämerellä sijaitsee Nahkiaisen majakka noin 20 kilometrin päässä keskimääräisestä rannikkoviivasta (Ilmatieteen laitos, 2017d). Lähin maa-alue sijaitsee kaakossa. Asemalla on kaksoistuulianturit: ykkösanturit ovat majakkarakennuksen helikopteritason koillisreunalla ja kakkosanturit luoteisreunassa. Molemmat anturit ovat noin 1 metrin korkeudella helikopteritasosta ja 32,6 metrin korkeudella merenpinnasta (kuvat 11 ja 12).

Nahkiaisen majakka on rakennettu vuonna 1956 samalla tavalla kuin edellä mainittu Kemi I, eli merenpohjaan upotetun betonisen jalustan päälle (Laurell et al., 1999). Merenpohjan syvyys majakan kohdalla on 14 metriä. Säähavaintoasema on merkitty perustetuksi vuoden 1997 syyskuussa, jolloin ensimmäiset havainnot on kirjattu Ilmatieteen laitoksen havaintotietokantaan (Ilmatieteen laitos, 2017d).



**Kuva 11:** Arkistokuva Nahkiaisen majakasta. Kuva: Ilmatieteen laitos, 2017c.



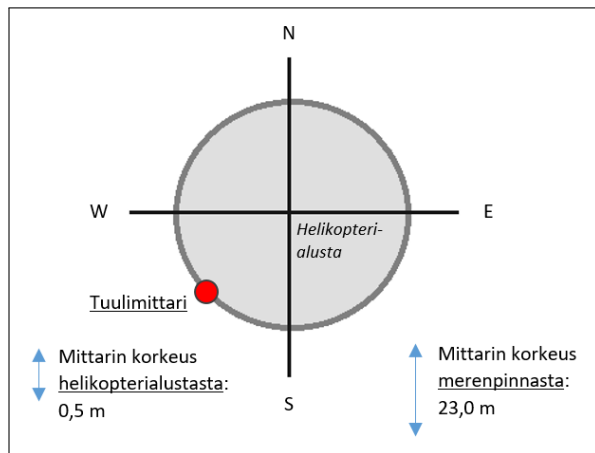
**Kuva 12:** Nahkiaisen majakan tuulimittarit. Valokuvat: Ilmatieteen laitos, 2017c.

### 3.1.3 Kristiinankaupungin majakka

Selkämeren Kristiinankaupungin majakka sijaitsee avomerellä Kristiinankaupungin edustalla (Ilmatieteen laitos, 2017d). Manner on idän puolella noin 10 kilometrin päässä. Tuulimittari sijaitsee majakan katolla 23,0 metrin korkeudella merenpinnasta. Mittari on sijoitettu helikopteritason lounaispuolelle, noin 0,5 metriä tason yläpuolelle (kuvat



**Kuva 13:** Arkistokuva Kristiinankaupungin majakasta. Kuva: Ilmatieteen laitos, 2017c.



**Kuva 14:** Kristiinankaupungin majakan tuulimittari. Valokuva: Ilmatieteen laitos, 2017c.

13 ja 14).

Kristiinankaupungin majakka on rakennettu vuonna 1991 (Laurell et al., 1999). Se on valettu kiinni merenpohjaan upotettuun lieriömäiseen teräspilariin ja rakennettu pääosin teräksestä. Majakan käyttövoimana on tuuli- ja aurinkoenergia. Sääasema on otettu käyttöön vuoden 1997 syyskuussa.

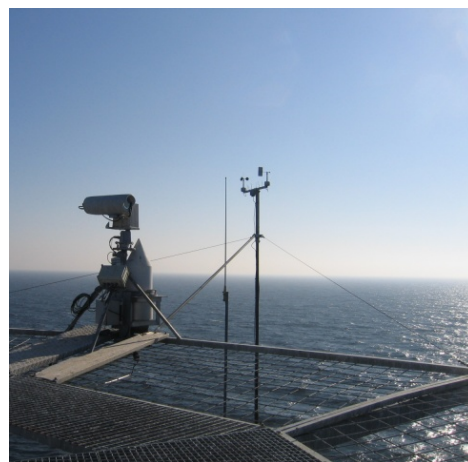
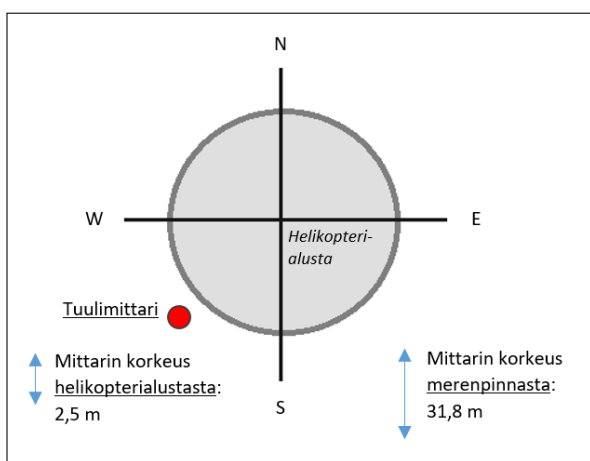
### 3.1.4 Porvoon Kalbådagrund

Kalbådagrundin majakka sijaitsee avomerellä Suomenlahdella (Ilmatieteen laitos, 2017d). Saaristoalue alkaa pohjoisen puolella noin 16 kilometrin etäisyydellä ja keskimääräiseen rannikkoviivaan on matkaa noin 30–40 kilometriä. Muista aineiston majakoista poiketen tuulimittari ei sijaitsekaan helikopterialustalla, vaan hieman alemmalla tasolla pitkän mittausmaston päässä. Mittausmasto on helikopterialustan lounaispuolella ja tuulimittari nousee noin 2,5 metriä helikopteritason yläpuolelle, ollen noin 31,8 metriä merenpinnan yläpuolella (kuvat 15 ja 16).

Porvoo Kalbådagrund majakka on rakennettu vuonna 1952



**Kuva 15:** Porvoon Kalbådagrundin majakka. Kuva: Fyrviki, E. Paunonen.



**Kuva 16:** Porvoon Kalbådagrundin majakan tuulimittari. Valokuva: Ilmatieteen laitos, 2017c.

ollen Suomen ensimmäinen isompi kasuunipohjainen pohjamajakka (Laurell et al., 1999). Kasuunipohja upotettiin 10 metrin syvyyteen merenpohjaan. Majakka oli miehittämätön jo heti valmistumisen jälkeen ja toimi dieselgeneraattoreiden voimilla. Nykyisin majakka toimii aurinkoenergialla.

### 3.1.5 Anemometri

Anemometri on mittalaite, jolla havainnoidaan tuulta (Ilmatieteen laitos, 2018a). Käytössä on joko kuppi- tai akustisia anemometrejä. Kup-

pianemometrissä (kuva 17) on kuppimaiset siipirattaat, joiden pyörimisnopeudesta määritetään tuulen nopeus. Erillisestä tuuliviiristä määritetään tuulen suunta (Karttunen, 2008). Akustinen anemometri (kuva 17) on nykyaikaisempi mittalaite, joka laskee äänen nopeuden eroja lähettimen ja vastaanottimen välillä kolmessa eri ulottuvuudessa. Akustisella anemometrillä voidaan määrittää sekä tuulen nopeus että suunta.

### 3.2 EUMETSAT ASCAT tuulituotteet

EUMETSAT ja OSI SAF -osaamiskeskus tarjoavat operatiivisia ASCAT tuulituotteita, joissa on joko 12,5 tai 25 kilometrin välein tuulivektorisoluja resoluutiolla 25 tai 50 kilometriä (EUMETSAT, 2015; OSI SAF, 2016). Tuotteet on koottu taulukkoon 2, jossa näkyy myös havaintojakso, jolloin tuotteita on ollut saatavilla. Taulukossa olevat MetOp-A ja MetOp-B viittaavat satelliitteihin, joiden hyötykuormana on muun muassa ASCAT instrumentti. A-satelliitti laukaistiin vuoden 2006 lokakuussa ja B-satelliitti seurasi perässä vuoden 2012 syyskuussa. Operatiivista A-satelliitin ASCAT dataa on



**Kuva 17:** Tuulimittareita. Kuppianemometri (vasemmalla) ja akustinen anemometri (oikealla). Kuvat: Pixabay (vasen) ja Ilmatieteen laitos, 2017b (oikea).

**Taulukko 2:** Operatiiviset EUMETSAT:in ja OSI SAF:in tarjoamat ASCAT tuulituotteet. Lähde: OSI SAF, 2016.

Tuote	Tuulivektori- solun säde	Reso- luutio	Ajanjakso
MetOp-A ASCAT 25 km	25 km	50 km	03/2007–
MetOp-B ASCAT 25 km	25 km	50 km	11/2012–
MetOp-A ASCAT 12,5 km	12,5 km	25 km	03/2009–04/2015
MetOp-A ASCAT coastal	12,5 km	25 km	03/2010–
MetOp-B ASCAT coastal	12,5 km	25 km	11/2012–

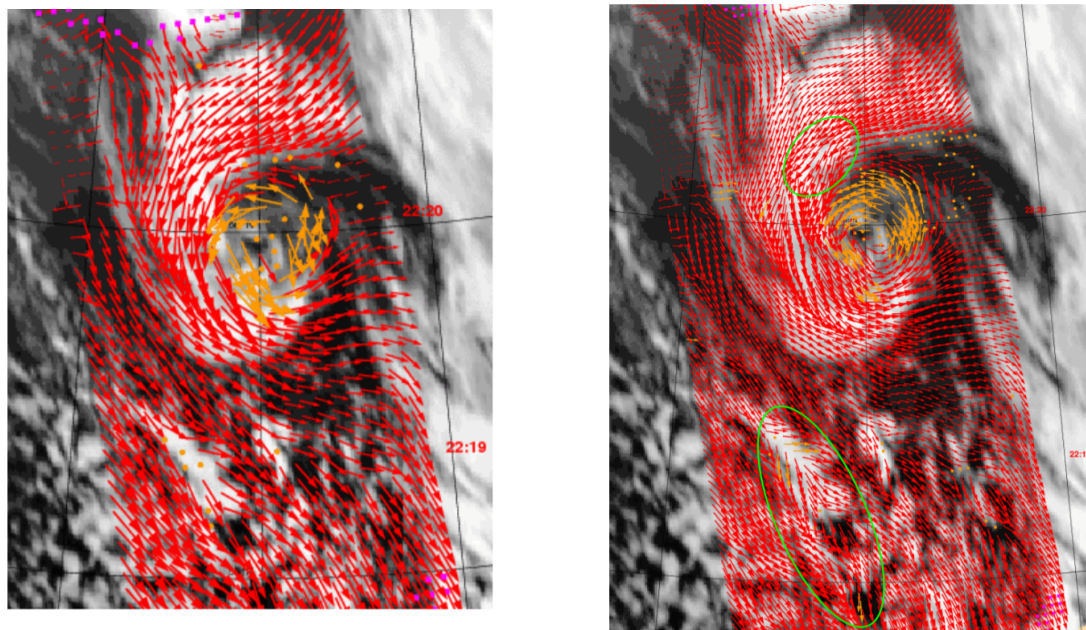
ollut saatavilla vuoden 2007 maaliskuusta alkaen ja B-satelliitin dataa lokakuusta 2012 alkaen. Molemmat satelliitit sisältävät samanlaisen ASCAT instrumentin.

Kuvassa 18 on esimerkit ASCAT 25 ja 12,5 kilometrin tuulituotteista, josta näkee tarkemman (12,5 km) ja vähemmän tarkan (25 km) resoluution tuotteiden eron (Verhoef ja Stoffelen, 2013; OSI SAF, 2016). Tarkemman resoluution tuulituote edustaa paikoitellen vallitsevaa tuulikenttää selkeästi paremmin verrattuna vähemmän tarkan resoluution tuulituotteeseen.

### 3.2.1 EUMETSAT ASCAT rannikko-optimoitu tuulituote

EUMETSAT:illa on tarjolla kahdenlaisia tuulituotteita; niin kutsuttu normaali ja “coastal” tuulituote. Tässä työssä “coastal” tuulituotetta kutsutaan nimellä rannikko-optimoitu tuulituote. Se on suunniteltu sopimaan erityisen hyvin tuulen määrittämiseen rannikon läheltä (Verhoef et al., 2012; OSI SAF, 2016). Tuotteen tuulivektorisolun säde on 12,5 kilometriä ja resoluutio 25 kilometriä. Tässä työssä käytetään rannikko-optimoituja tuulituotteita nimeltä “MetOp-A ASCAT coastal Winds” ja “MetOp-B ASCAT coastal Winds”. Tuulituotteet ovat ladattu KNMI:n datakeskuksesta netCDF-muodossa.





**Kuva 18:** ASCAT 25 km (vasemmalla) ja 12,5 km (oikealla) normaalit tuulituotteet 13.12.2008 22:20 UTC Atlantin valtameren yllä. Taustalla infrapunakuva pilvistä. Vihreillä ympyröillä on osoitettu alueita, joissa tarkemman resoluution tuulituote edustaa vallitsevaa tuulikenttää selkeästi paremmin. Kuvat: Verhoef ja Stoffelen, 2013.

Oleellinen ero normaalin ja rannikolle sopivan tuulituotteen välillä on takaisinsironnan keskiarvoistusmenetelmässä ja maa-alueiden tarkkuudessa (Verhoef et al., 2012). Rannikko-optimoitu tuulituote käyttää lisätietona alkuperäisiä tutkakeilojen takaisinsirontahavainnot, joita ei ole vielä keskiarvoistettu tuulivektorisoluittain. Kerätyt tarkemmat havainnot keskiarvoistetaan laatikkosuodattimella. Tarkempien takaisinsirontahavaintojen ja käytetyn keskiarvoistusmenetelmän johdosta tuulen määrittäminen rannikkoalueelle on tarkempaa verrattuna normaaleihin tuulituotteisiin.

Rannikko-optimoidussa tuulituotteessa maa-alueiden pohjana on käytetty Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskuksen (ECMWF) operatiivisen mallin maakarttaa, jonka hilaväli on 25 kilometriä (Verhoef et al., 2012). Jokaisesta yksittäisestä takaisinsirontahavainnosta, joka on alle 20 kilometrin etäisyydellä maa-alueen



hilapisteestä, lasketaan kuinka suuri osa takaisinsironnasta on saatu maa-alueelta. Takaisinsironta-arvo rajataan pois, mikäli yli 2 %:a havaitusta alueesta on maata. Siten tuuli voidaan määrittää lähimmillään noin 15 kilometrin etäisyydeltä rannikosta.

Yleisesti ASCAT rannikko-optimoidun tuulituotteen laatu on hyvä ja tuote edustaa 10 metrin korkeudella puhaltavaa todellista tuulta hyvin (OSI SAF, 2016). Jokaisesta tuulivektorisolusta tuleva takaisinsironta on laatutarkistettu. Huonompilaatuiset tuulivektorisolut ovat liputettu laatukontrollilipulla (QC flag).

Tuulivektorisolun laatua heikentävät muun muassa solun sisäpuolella esiintyvä sade, tuulen runsas vaihtelu ja maa-alueiden tai jään esiintyminen (Portabella et al., 2014; OSI SAF, 2016). Maa-alueen tai jään esiintyminen tuulivektorisolun sisällä aiheuttaa häiriöitä tuulen määrittämiseen, sillä tuuli lasketaan merenpinnan rosoisuuden avulla. Sateen vaikutus ASCAT tuulituotteen tapauksessa on pieni, sillä  $C$ -taajuuskaista ei ole herkkä sateelle. Suurin häiriötekijä on pisaroiden iskeytyminen merenpintaan, mikä korostuu voimakkaan sateen tapauksessa. Rosoisempi pinta aiheuttaa tuulen yliarvioimista etenkin pienillä tuulennopeuksilla. Tuulen runsas vaihtelu sen sijaan kasvattaa tuulivektorisolun sisällä tuulen vaihtelua ja siten huonontaa tuulituotteen laatua. Myös tuulen nopeuden arvo liputetaan, jos se on  $\leq 3$  m/s tai  $> 30$  m/s, sillä näiden raja-arvojen ulkopuolella tarkkuus on merkittävästi huonompi.

EUMETSAT esittää tuoteselosteessaan (EUMETSAT, 2015) ASCAT tuulituotteiden tarkkuuden olevan taulukon 3 mukainen. Verifioinnin on toteuttanut OSI SAF -osaamiskeskus ECMWF:n aineiston avulla. Keskimäärin tuulikomponenttien keskihajonta on alle 2

**Taulukko 3:** ASCAT tuulituotteiden tarkkuus verrattuna ECMWF:n tuulihavaintoihin. Lähde: EUMETSAT, 2015.

Tuote	Keskihajonta u-komp. (m/s)	Keskihajonta v-komp. (m/s)	Harha tuulen nopeus (m/s)
MetOp-A ASCAT	1,72	1,76	-0,02
MetOp-B ASCAT	1,78	1,80	0,05

m/s ja tuulen nopeuden harha on alle 0,5 m/s verrattuna varsinaisiin havaintoihin.

Yleisesti voidaan sanoa, että mitä pienempi on takaisinsironnan keskiarvoistamisalue, sen lähempää rannikkoa ja sen tarkemmin saadaan tuulitietoa (Verhoef et al., 2012). Toisaalta samalla tuulihavaintojen kohina kasvaa, sillä keskiarvoistettavien takaisinsirontahavaintojen lukumäärä pienenee.

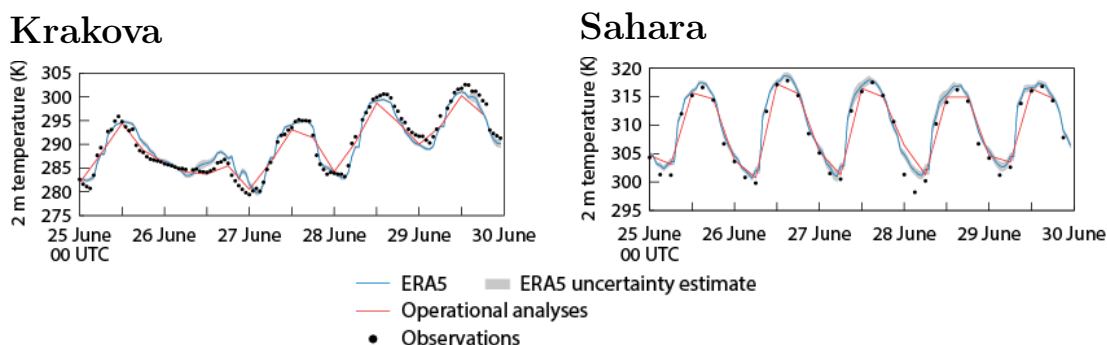
### 3.3 ERA5 uusanalyysi

ERA5 uusanalyysi on uusin ECMWF:n tarjoamista uusanalyyseistä. ERA5 uusanalyysin edistysaskeleet edellisiin uusanalyysihin verrattuna ovat tarkka alueellinen ja ajallinen erotuskyky sekä arvio datan epävarmuudesta (Hersbach ja Dee, 2016). ERA5:n resoluutio eli alueellinen erotuskyky on 31 kilometriä globaalisti ja ajallinen tarkkuus yksi tunti. Vertailun vuoksi 10 vuotta vanhan ERA-Interim uusanalyysin resoluutio on 79 kilometriä ja ajallinen tarkkuus kuusi tuntia.

Kuvassa 19 on verrattu ERA5 uusanalyysiä ECMWF:n operatiiviseen analyysiin ja havaittuun 2 metrin korkeudella olevaan lämpötilaan kahdessa pisteessä: Krakovan lähellä Puolassa ja Saharan aavikolla (Hersbach ja Dee, 2016). Kuvasta nähdään, että pääsääntöisesti ERA5 edustaa havaittua lämpötilaa paremmin kuin ECMWF:n operatiivinen analyysi.

ERA5 tarjoaa arvioita mm. menneestä ilman lämpötilasta, paineesta, tuulesta, kosteudesta ja otsonista eri korkeuksilta, sekä sademäärästä meren pinnalla, maaperän kosteudesta ja meren pintalämpötilasta (Hersbach, 2017). ERA5:n uusanalyysiaineisto on hiljattain laitettu julkisesti saataville vuodesta 2010 eteenpäin (Hersbach ja Dee, 2016; Copernicus Climate Change Service, 2018).

Tämän tutkielman ERA5 aineisto on ladattu Web-API-työkalun avulla ECMWF:n tietokannasta (niin kutsuttu MARS-haku) netCDF-muodossa. ERA5 uusanalyysistä on haettu meren pintalämpötila (SST), jota on käytetty ilmakehän hydrostaattisen stabiilisuuden määrittämiseen majakkapisteiden läheltä. Aineiston haussa on käytetty  $0,3^\circ \times 0,3^\circ$  hilaa. ERA5 uusanalyysissä meren pintalämpötilalle on määritetty ainoastaan yksi arvo per päivä hila-pisteittäin ja tämän vuoksi haetun aineiston ajallinen tiheys ei ole ollut tämän suurempi.



**Kuva 19:** ERA5 uusanalyysin vertailu ja ECMWF:n operatiiviseen analyysiin ja 2 metrin havaittuun lämpötilaan ajanjaksolta 25.-30.6.2014. Vasen kuva on Krakovan läheltä Puolasta ( $50.03^\circ \text{N}$ ,  $20.25^\circ \text{E}$ ) ja oikea kuva Saharan aavikolta ( $26.5^\circ \text{N}$ ,  $8.42^\circ \text{E}$ ). Havainnot: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Kuva: Hersbach ja Dee, 2016.

## 4 Aineiston analysointimenetelmät

Tässä luvussa käydään läpi aineiston hakemisen ja käsittelyn eri vaiheet. Aineistoa on haettu yhteensä 49 kuukauden ajalle, mutta havaintojakso ei ole ajallisesti yhtenäinen. Skatterometrihavaintojen ajallinen jatkumo yksittäisessä pisteessä on katkonainen ja havaintoja on jouduttu karsimaan reilusti, jotta käytetty aineisto olisi tarpeeksi laadukasta. Luvussa kerrotaan aluksi, millä perusteella aineistoa on karstittu ja sen jälkeen esitellään menetelmät, joilla aineistoa on käsitelty ja tuloksia laskettu.

### 4.1 Aineiston rajaus

Tässä työssä vertailutietona käytettyä skatterometrituulta oli saatavilla majakoiden läheltä aina silloin, kun MetOp-satelliitit ovat osuneet alueen ylle ja saaneet havainnon poimittua. Molemmat MetOp-A ja -B satelliitit havainnoivat Itämerta keskimäärin kaksi kertaa päivässä, aamupäivällä ja illalla. Mikäli havaittu alue on ollut tarpeeksi lähellä majakkapisteitä ja havainnon laatu ollut hyvä, niin havainnot alueelta on tallennettu. Kuukaudessa ajanhetkiä yhtä majakkaa kohti kertyi keskimäärin noin muutamasta kymmenestä muutamaan sataan. Kerätty aineisto ei siis ole ajallisesti katkeamatonta jatkumoa, vaan se koostuu monista yksittäisistä havaintohetkistä pitkältä ajalta. Tämän vuoksi aineistoa oli kerättävä usealta vuodelta.

Majakka-aineistosta on valittu skatterometriaineistoa vastaavat tuulet. Joka majakalle määritettiin oma maksimietäisyys skatterometrituulen keräämiselle, eli kuinka suurelta alueelta majakan ympäriltä kerätään skatterometrituulta. Maksimietäisyys pyrittiin asetta-

maan mahdollisimman pieneksi, mutta kuitenkin tarpeeksi suureksi, jotta jokaisen majakan läheltä saatiin kerättyä tarpeeksi havaintoja. Osa majakoista sijaitsi sen verran lähellä maa-alueita, että skatterometrituulta oli otettava kauempaa kattavan aineiston keräämiseksi. Näissä tapauksessa tuulen suunnan ollen maalta päin, havaintoja kertyy vähemmän, sillä skatterometrituuli on silloin harvemmin laadukasta ja monet havainnoista liputetaan laatukontrollilipulla. Kemin maksimietäisyysvaatimus oli 15 kilometriä, Nahkiaisen oli 40 kilometriä sekä Kristiinankaupungin ja Kalbådagrundin oli 70 kilometriä.

Skatterometrihavainnon etäisyys majakkapisteeseen on laskettu  $x$ - ja  $y$ -komponenttien sekä Pythagoraan lauseen avulla. Meridionaalinen ja zonaalinen etäisyys pallopinnalla esitetään  $x$ - ja  $y$ -komponenttien avulla:

$$x = r \cos \phi_1 \Delta\lambda \quad (3)$$

$$y = r \Delta\phi, \quad (4)$$

missä  $r$  on Maan säde,  $\lambda$  on tarkasteltavan pisteen pituusaste ja  $\phi$  leveysaste (Holton ja Hakim, 2013, s. 37).  $\phi_1$  on perusleveyspiiri, joka voidaan approksimoida seuraavasti:

$$\phi_1 = 0,5\Delta\phi \quad (5)$$

(Movable Type, 2018). Kahden pisteen välinen etäisyys  $d$  on laskettu

Pythagoraan lauseen avulla:

$$d = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (6)$$

Skatterometrihavainto katsottiin vastaavan majakkahavaintoa, mikäli se ajallisesti osui alle 10 minuutin etäisyydelle majakkahavainnosta. Mikäli skatterometrihavaintoja oli useampi yhtä majakkahavaintoa kohden, otettiin skatterometrituulen nopeuksista ja suunnista keskiarvo. Tuulen suunnan keskiarvoistamista varten asteet oli muutettava tuulen u- ja v-komponenteiksi: muutoin luoteistuulen ( $315^\circ$ ) ja koillistuulen ( $45^\circ$ ) keskiarvoksi olisi tullut etelätuuli ( $180^\circ$ ) pohjoistuulen ( $360^\circ/0^\circ$ ) sijaan.

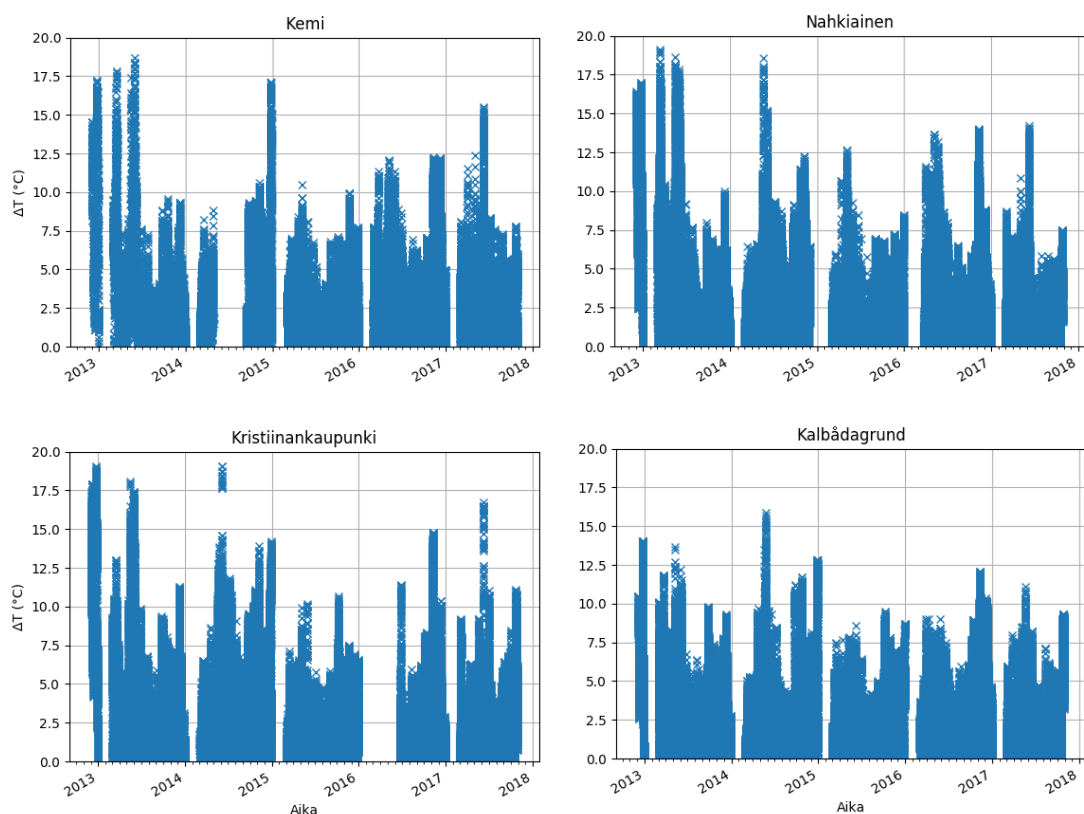
Skatterometrituulen suunta on ilmoitettu käytetyissä aineistossa oseanografisessa konventiossa, joka on päinvastainen perinteisemmälle meteorologiselle konventiolle (OSI SAF, 2016). Oseanografisessa konventiossa  $0^\circ$  tarkoittaa tuulen puhaltavan etelästä ja  $180^\circ$  pohjoisesta. Tässä työssä suunnat on muutettu vastaamaan tuttua meteorologista konventiota.

Käytetyt havaintohetket ovat rajattu ilmakehän stabiilisuuden perusteella. Aineistossa pyrittiin jättämään ulkopuolelle sekä stabiilit että epästabiilit tilanteet ja jättää siis jäljelle neutraalit tilanteet. Rajauksen tarkoituksena oli varmistaa skatterometrituulen vastaavan mahdollisimman hyvin todellista tuulta.

Ilmakehän stabiilisuus testattiin yksinkertaisesti vertailemalla kahden eri tason lämpötiloja toisiinsa. Ylemmän tason havainto saatiin majakasta mitatusta lämpötilahavainnosta ja alemman tason lukema ERA5 uusanalyysin meren pintalämpötilasta. Lämpötilaeron

ollessa alle 2 astetta ilmakehä tulkittiin riittävän neutraaliksi. Lämpötilaero pyrittiin rajaamaan mahdollisimman pieneksi, mutta aineiston kattavuuden takaamiseksi sitä ei voitu asettaa liian pieneksi. Uusanaalyysin tuottama pintalämpötila ei luonnollisestikaan vastaa esimerkiksi pinnan yläpuolelta lämpömittarilla havaittua lämpötilaa, mutta on riittävän tarkka karsimaan selvästi stabiilit ja epästabiilit tilanteet pois.

Kuva 20 havainnollistaa majakan havaintolaitteiden ja merenpinnan välistä lämpötilaeroa koko ajanjakson ajalta. Poimitusta havaintoaineistosta noin kaksi kolmasosaa karsiutui pois stabiilisuustarkastelun myötä. Havaintohetkiä jokaista majakkaa kohden jäi kuitenkin riittävästi. Vaihtoehtoisia stabiilisuusmittareita olisivat olleet Mo-



**Kuva 20:** Lämpötilaero ( $^{\circ}\text{C}$ ) merenpinnan ja majakan havaintolaitteen välillä koko havaintojakson ajalta.

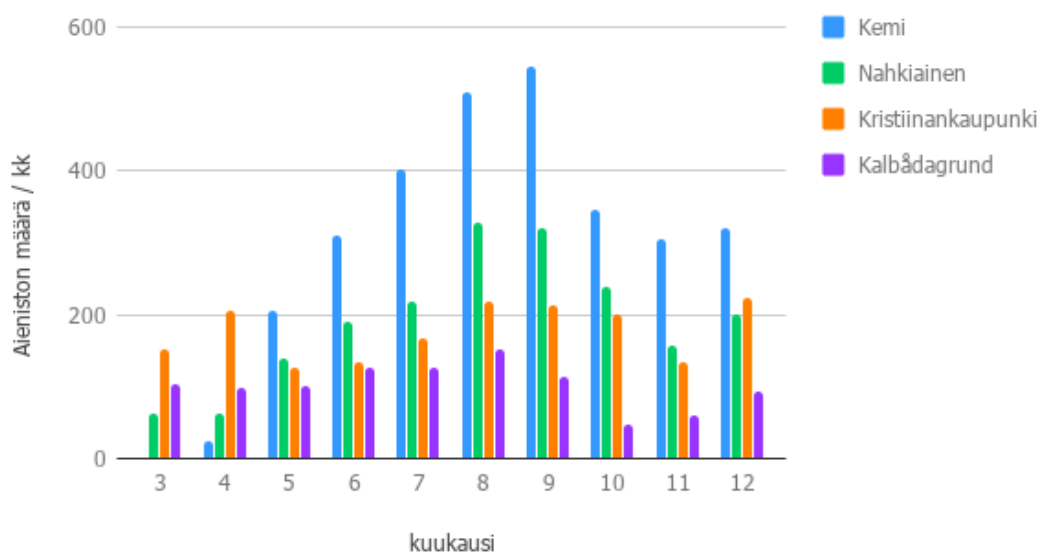
nin Obukhovin pituus tai Richardsonin luku, mutta parametrien saatavuus muodostui ongelmaksi ja siksi nämä vaihtoehdot eivät toteutuneet.

Lopullisen aineiston jakautuminen kuukausittain on havainnollistettu kuvassa 21. Kuvasta voidaan nähdä, että aineisto on jakautunut epätasaisesti kuukausien välillä. Myöhäiskesällä elo–syyskuussa aineistoa on saatu poimittua eniten. Keväällä määrä on kaikista vähäisin ja syksyn edetessä määrät ovat myös kääntyneet laskuun. Selittäviä tekijöitä ovat ainakin merijään esiintyminen sekä ilmakehän tyypillinen stabiilisuus keväällä ja epästabiilisuus syksyllä.

## 4.2 Aineiston käsittely ja vertailu

Aineistoa on tutkittu erilaisten tilastollisten tunnuslukujen ja kuvaajien avulla. Aineistoa on myös luokiteltu eri perustein ja etsitty luokille ominaisia piirteitä.

Tuuliruusu-kuvaajien avulla saadaan yleiskatsaus tuulen no-



**Kuva 21:** Aineiston määrän jakautuminen koko havaintojaksolla vuosien 2012–2017 välillä.



peuksien ja suuntien suhteellisista osuuksista. Hajontakuvaajan avulla sen sijaan voidaan tarkastella majakkatuulen vastaavuutta skatterometrituuleen. Hajontakuvaajasta voidaan visuaalisesti nähdä mahdollinen harha tai tuulihavaintojen laadun heikkeneminen tietyillä tuulen nopeuksilla.

Aineistoa on myös luokiteltu vuodenaikojen, tuulen suuntien ja nopeuksien perusteella. Tavoitteena on ollut selvittää, mikäli tuloksissa on eroavaisuuksia esimerkiksi kevään ja syksyn tai heikon ja kohtalaisen tuulen välillä. Vuodenajoittain luokiteltuna kevätkuukausiin on luettu maaliskuu-, huhti- ja toukokuu, kesäkuukausiin kesä-, heinä- ja elokuu, sekä syyskuukausiin syys-, loka-, marras- ja joulukuu. Syyskuukausiin on lisätty joulukuu ylimääräisenä, sillä pelkästään joulukuun aineisto ei olisi ollut tarpeeksi kattava edustamaan talven havaintoja.

Tuulen suuntien perusteella luokiteltu aineisto on jaettu neljään eri tuulensuunnan sektoriin pääilmansuuntien mukaan. Sektorit ovat seuraavat:  $315\text{--}45^\circ$  (pohjoinen),  $45\text{--}135^\circ$  (itä),  $135\text{--}225^\circ$  (etelä) ja  $225\text{--}315^\circ$  (länsi). Tuulen nopeuksien perusteella luokittelu on toteutettu luvussa 2 esitetyn tuulennopeusasteikon (taulukko 1) rajojen mukaan. Tuulennopeus on heikko kun se on välillä  $1,6\text{--}3,3$  m/s, kohtalainen välillä  $3,4\text{--}7,9$  m/s, navakka välillä  $8,0\text{--}13,8$  m/s ja kova välillä  $13,9\text{--}20,7$  m/s. Muita luokkia ei ollut tarpeen ottaa tässä työssä mukaan, sillä niistä ei ollut juurikaan havaintoja. Kaikki aineiston luokitteluperusteet ovat koottu taulukkoon 4.

Majakkahavaintojen täsmällistä vertailua varten aineistosta on laskettu absoluuttinen keskivirhe (MAE) ja keskineliövirheen neliöjuuri (RMSE). Harhan määrittämistä varten on laskettu keskivirhe (ME).

**Taulukko 4:** Aineiston luokitteluperusteet.

Vuodenaika	Tuulen suunta	Tuulen nopeus
kevät	315–45° (pohjoinen)	1.6–3.3 m/s (heikko)
kesä	45–135° (itä)	3.4–7.9 m/s (kohtalainen)
syksy	135–225° (etelä)	8.0–13.8 m/s (navakka)
	225–315° (länsi)	13.9–20.7 m/s (kova)

MAE on ennusteen tarkkuutta mittaava luku ja se lasketaan seuraavasti:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |y_k - o_k|, \quad (7)$$

missä  $n$  on ajanhetkien lukumäärä,  $k$  on havaintosarjan indeksi, joka kasvaa kunnes  $k = n$ ,  $y$  on ennusteaineisto ja  $o$  on havaintoaineisto (Wilks, 1995). MAE sopii myös mittaamaan kahden havaintoaineiston vastaavuutta toisinsa. Tässä työssä majakkahavainnot vastaavat kaavan ennustetta  $y$  ja skatterometrihavainnot vastaavat havaintoa  $o$ . MAE on siis aritmeettinen keskiarvo aineistojen poikkeamien itseisarvoista. Aineistojen vastatessa täydellisesti toisiaan MAE on nolla ja erojen kasvaessa MAE:n lukuarvo kasvaa.

Wilks (1995):n mukaan RMSE on myös ennusteen tarkkuutta mittaava luku. RMSE lasketaan seuraavasti:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2}. \quad (8)$$

RMSE korostaa etenkin suuria poikkeamia toiseen potenssiin korottamisen seurauksena.

ME on ennusteen ja havaintojen keskiarvojen erotus:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k) \quad (9)$$

(Wilks, 1995). ME kertoo majakkahavaintojen harhan verrattuna skatterometrituuleen. Mikäli  $ME > 0$  majakka-aineisto antaa keskimäärin voimakkaampia tuulennopeuksia ja vastaavasti kun  $ME < 0$  keskimäärin heikompia tuulennopeuksia.

## 5 Tulokset

Tässä luvussa esitellään tutkimuksessa saatuja tuloksia tuulen nopeuden ja suunnan muutoksista. Kaikkien neljän majakan tuulihavaintoja on verrattu skatterometrituuleen, jonka oletetaan edustavan todellista tuulta 10 metrin korkeudessa.

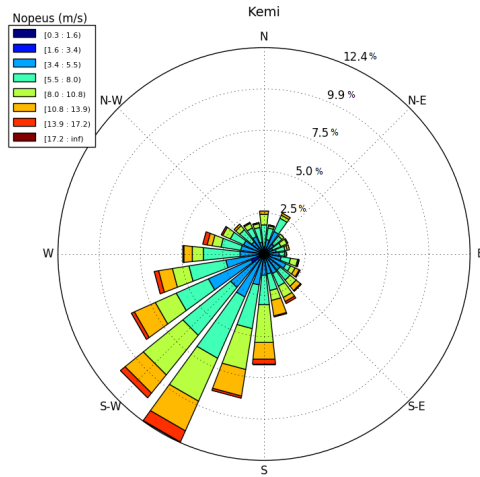
Tuuliruusut (kuvat 22 ja 23) antavat visuaalisen yleiskuvan majakoiden tuulioloista koko havaintojaksolta. Tuuliruusuista voidaan silmämääräisesti nähdä, että majakkatuulen suunta on keskimäärin kääntynyt vastapäivään skatterometrituulen suunnasta. Skatterometrituulien kohdalla heikompien tuulennopeuksien osuus on suurempi majakkatuuliin verrattuna ja vastaavasti voimakkaampien tuulien osuus on suurempi majakka-aineistossa.

Tuuliruusut antavat suurpiirteisen käsityksen tuulen nopeuden ja suunnan tuloksista. Täsmällistä tarkastelua varten tuulen nopeutta ja suuntaa on kuitenkin tarkasteltava erikseen. Tuulen nopeuden kuvaajia on tehty sekä koko havaintosarjasta että jokaisesta vuodenajasta (kevät, kesä ja syksy) erikseen. Lisäksi tuulen nopeuteen ja suuntaan liittyviä tilastollisia lukuja on koottu taulukoihin. Tuulen nopeuden tulokset ovat esitetty kappaleessa 5.1 ja tuulen suunnan tulokset kappaleessa 5.2.

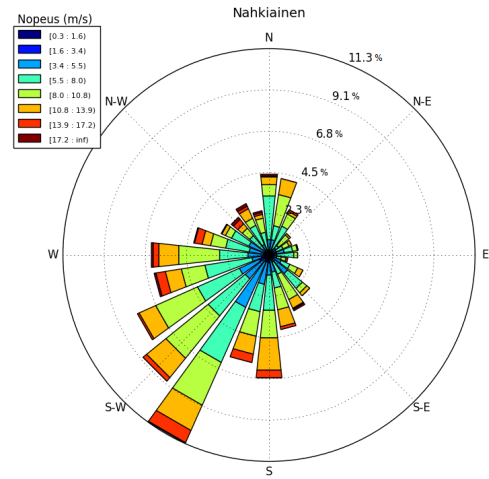
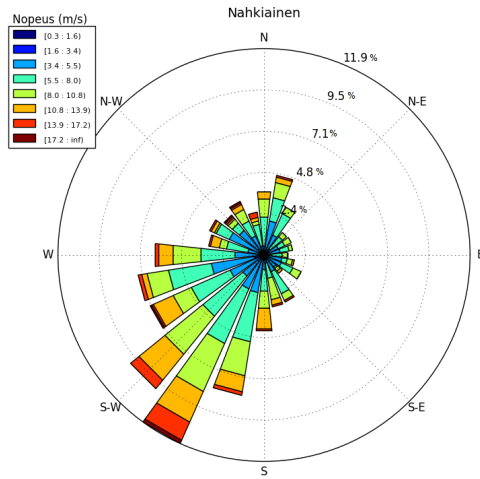
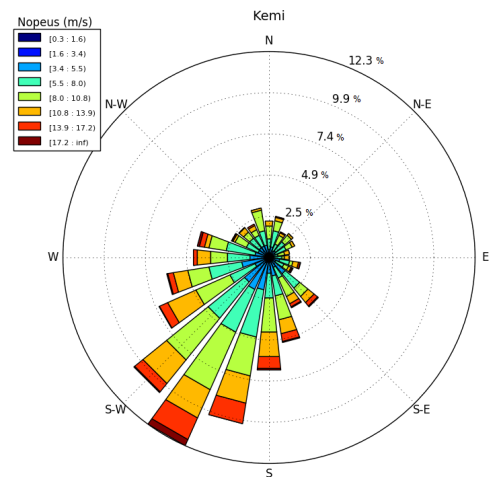
### 5.1 Tuulen nopeus

Majakkahavaintojen tuulen nopeuden virhettä kuvaavat tilastolliset luvut MAE ja RMSE ovat havainnollistettu kuvassa 24. Koko havaintojaksolta (maalis–joulukuu) kaikkien neljän majakan MAE on lähes sama sijoittuen välille 1,28–1,41. Vastaavalta ajalta RMSE sijoittuu

## Skatterometrituuli



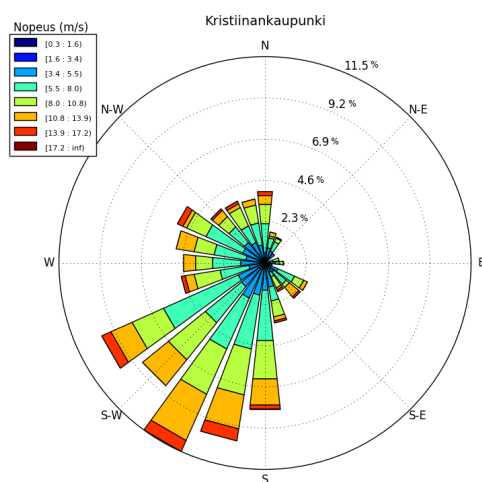
## Majakkatuuli



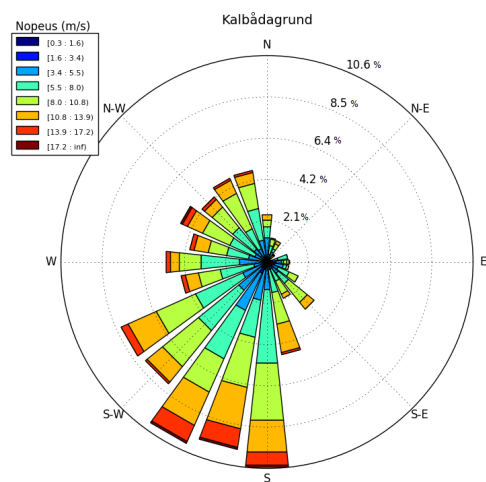
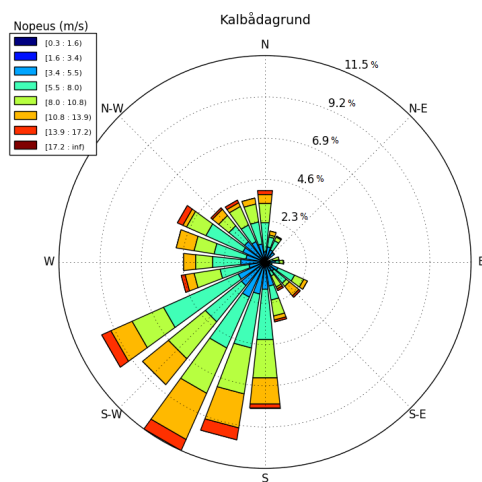
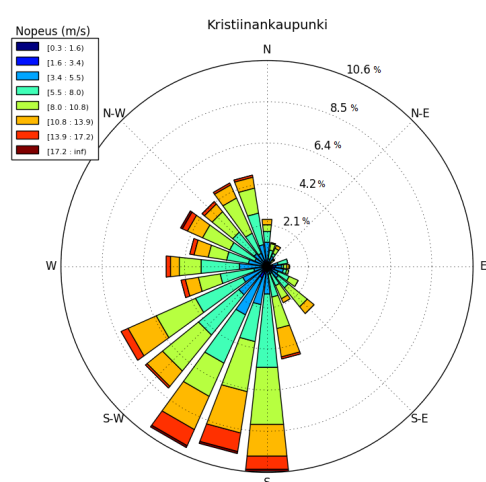
**Kuva 22:** Tuuliruusut Kemistä (yläkuvat) ja Nahkiaisesta (alakuvat) koko havaintojaksolta. Vasemmanpuoleiset kuvat ovat skatterometrituulta ja oikeanpuoleiset kuvat majakkatuulta. Kuvissa näkyvät prosenttirajat kuvaavat rajalle ulottuvan tuulensuunnan prosenttiosuutta kaikista kuvan tuulensuunnista.

välille 1,55–1,79. Kuvasta 24 nähdään, että Kemissä on keskimäärin pienin MAE ja RMSE, kun taas suurin MAE löytyy Kalbådagrundista ja suurin RMSE Kristiinankaupungista. Tulokset ovat samansuuntaisia myös vuodenajoittain tarkasteltuna, vaikkakin pieniä eroavaisuuksia vuodenaikojen välillä on. Keskimäärin virheet ovat suurempia keväällä kuin syksyllä.

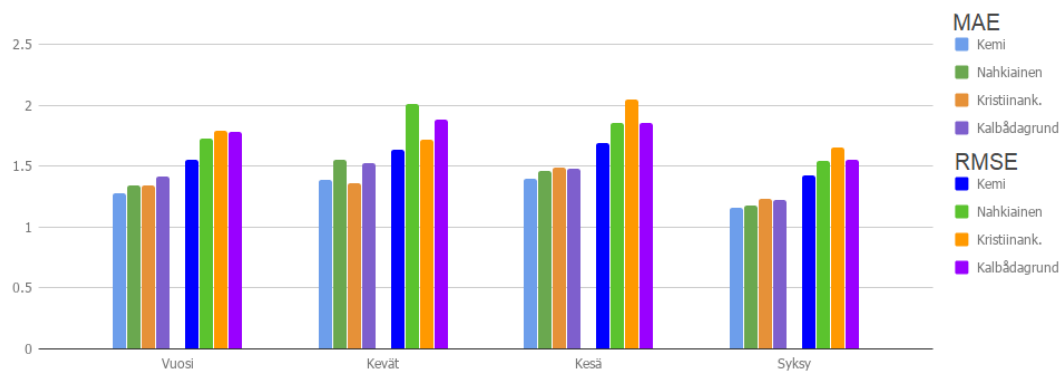
## Skatterometrituuli



## Majakkatuuli



**Kuva 23:** Kuten kuva 22, mutta yläkuvat ovat Kristiinankaupungista ja alakuvat ovat Kalbådagrundista.



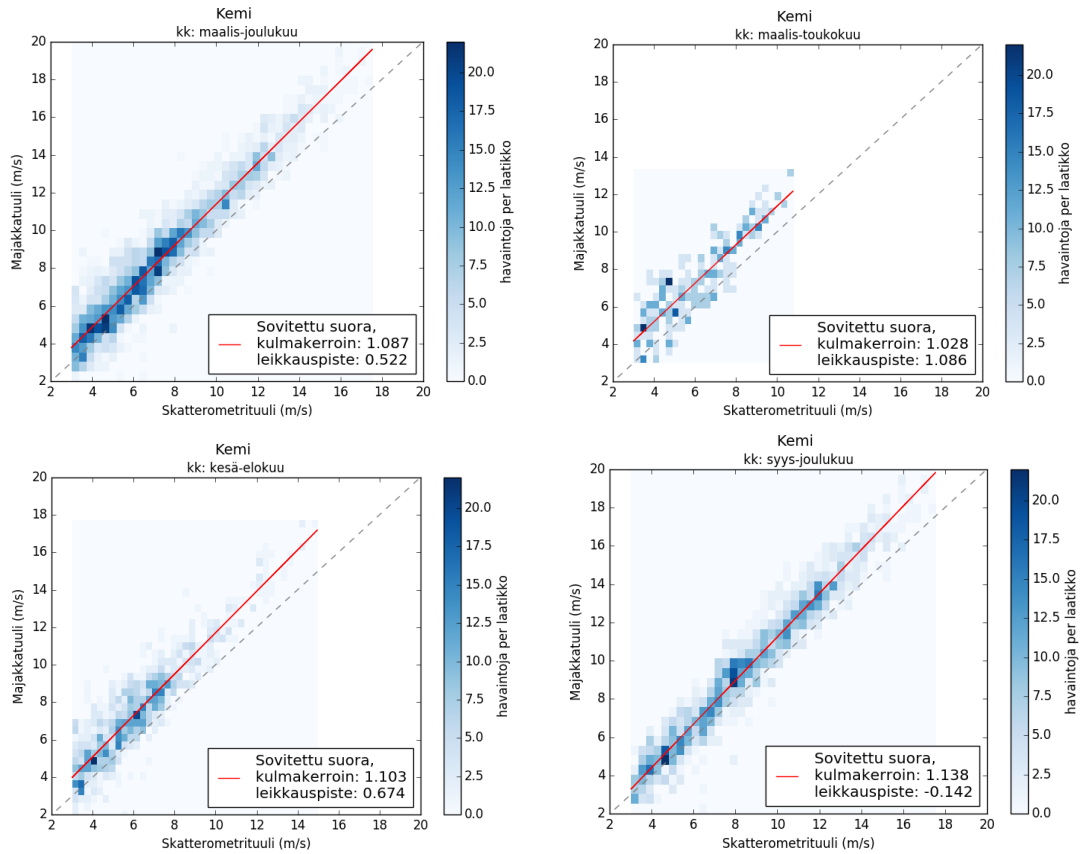
**Kuva 24:** Majakkahavaintojen MAE ja RMSE vuodenajoittain.

## Kemi

Kuvassa 25 on esitetty Kemi I majakan tuulennopeushavaintojen ja skatterometrihavaintojen erotus hajontakuvaajina. Hajontakuvaajat ovat tehty sekä koko havaintosarjalle (maalis–joulukuu) että vuodenajoittain (kevät, kesä ja syksy). Kuvasta nähdään, että majakan tuulennopeudet ovat keskimäärin voimakkaampia kuin skatterometrin. Kuvaajan perusteella yksittäisten vuodenaikojen tulokset eivät suuresti eroa muista, mutta pieniä eroja voidaan havaita.

Koko havaintosarjassa erotus ei juurikaan riipu tuulen nopeudesta, vaan ero on suunnilleen sama sekä pienillä että suurilla tuulennopeuksilla. Hajontakuvaajan pisteiden välille sovitettun suoran kulmakerroin on 1,087. Sovitettu suora on lähes  $x = y$  -suoran suuntainen leikaten y-akselin kohdassa 0,522. Suurilla tuulen nopeuksilla ero on hivenen suurempi kuin pienillä nopeuksilla. On kuitenkin huomioitava, että suuria tuulennopeuksia on aineistossa huomattavasti vähemmän kuin pieniä tuulen nopeuksia.

Vuodenaikojen välinen vertailu kuvassa 25 osoittaa, että syyskuukausina (syys–joulukuu) Kemin majakan tuulihavainnot eroavat kaikista vähiten skatterometrituulesta, kun taas kevätkuukausina (maalis–toukokuu) erotus on keskimäärin suurin. Kuva antaa viitteitä myös siitä, että keväällä erotus riippuu vähiten tuulen nopeudesta, kun taas syksyllä pienillä tuulen nopeuksilla ero on pienempi kuin suurilla tuulen nopeuksilla. Tosin keväällä aineistossa mukana olevat suurimmat tuulen nopeudet ovat noin 11 m/s, kun taas syksyllä ne ovat lähes 18 m/s luokkaa. Myös kevään aineistoa on lukumäärällisesti huomattavasti vähemmän syksyyn verrattuna, kuten taulukon 5 aineiston määristä nähdään. Niinpä kevään ja syksyn aineistoja ei



**Kuva 25:** Majakkatuulen nopeuden vertailu skatterometrituuleen Kemissä. Ylhäällä vasen kuva edustaa koko aikasarjaa, muut kuvat edustavat vuodenaikoja. Sinisen sävyiset laatikot edustavat havaintopisteitä; mitä tummempi sävy, sen enemmän havaintoja laatikon sisällä. Punainen viiva on sovitettu suora havaintopisteiden välille. Harmaa katkoviiva esittää  $x = y$  -suoraa.

voida tarkasti vertailla toisiinsa.

Tuulensuunnalla on taulukon 5 tilastojen perusteella vaikutusta Kemin tuloksiin. Itätuulella virhe ja harha ovat suurimmat, kun taas länsituulella ne ovat pienimmät. Itätuulen MAE on 1,52 ja RMSE on 1,81, kun taas länsituulen vastaavat luvut ovat 1,10 ja 1,39. Itätuulella harhaa kuvaava ME on 1,40, länsituulella vastaava luku on 0,96. Aineiston määrä on suurin etelätuulella (1328 havaintopistettä) ja pienin itätuulella (308 havaintopistettä).

Taulukossa 5 on myös eri tuulennopeusluokkien tilastot nähtävillä. Taulukon tilastoista voidaan huomata, että kovalla tuulella vir-



**Taulukko 5:** Kemin tuulen nopeuden tilastot kootusti.

	VUODENAIKA				TUULENSUUNTA				TUULENNOPEUS			
	Vuosi	Kevät	Kesä	Syksy	Pohj.	Itä	Etelä	Länsi	Heikko	Kohtal.	Navakka	Kova
<b>MAE</b>	1.28	1.39	1.40	1.16	1.45	1.52	1.29	1.1	0.85	0.94	1.52	2.11
<b>RMSE</b>	1.55	1.63	1.69	1.42	1.77	1.81	1.53	1.39	1.24	1.2	1.74	2.27
<b>ME</b>	1.15	1.26	1.3	1.02	1.29	1.4	1.19	0.96	-0.84	0.8	1.5	2.1
Aineiston määrä	2968	230	1223	4305	404	308	1328	928	81	1392	1257	238

heurvot ja harha ovat selvästi suurempia kuin heikolla tai kohtalaisella tuulella. Kovan tuulen MAE on 2,11 ja RMSE on 2,27, kun taas kohtalaisen tuulen vastaavat arvot ovat 0,94 ja 1,20. Kovan tuulen ME on 2,10, kohtalaisen tuulen vastaava arvo on 0,80. Heikon tuulen ME:n lukuarvo -0,84 on muista poikkeava, sillä poikkeama on negatiivinen, mutta kyseisen luokan aineisto on suppea. Aineiston määrä on suurin kohtalaisella ja navakalla tuulella (1392 ja 1257 havaintopistettä) ja pienin heikolla ja kovalla tuulella (81 ja 238 havaintopistettä).

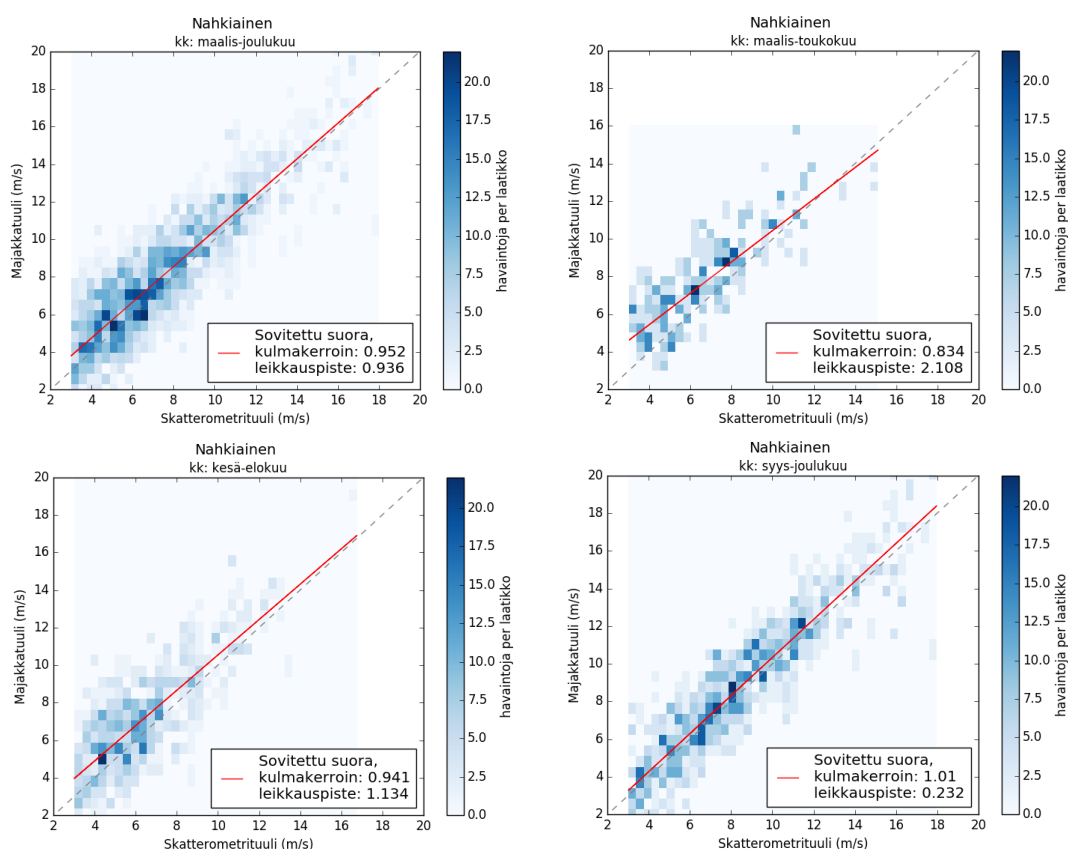
## Nahkiainen

Nahkiaisien majakan tuulennopeuden hajontakuvaaja (kuva 26) on hieman enemmän hajallaan kuin Kemin vastaava kuvaaja. Pisteet ovat sijoittuneet sekä ylä- että alapuolelle  $x = y$  -suoraa, kuitenkin enemmän ylä- kuin alapuolelle. Koko havaintosarjassa (maalis-joulukuu) ei nähdä juurikaan tuulennopeuden suuruuden perusteella eroja tuloksissa. Suoran sovitukselta nähdään, että keväällä tuulennopeuden vaikutus tuloksiin on suurin, kun taas syksyllä pienin. Jälleen on tosin todettava, että kevätkuukausien aineiston suppeuden takia tuloksissa esiintyy suurempia epävarmuuksia.

Tuulensuunnalla on taulukon 6 tilastojen perusteella vaikutusta Nahkiaisien tuloksiin. Pohjoistuulella virhe ja harha ovat suurim-

mat, kun taas etelä- ja itätuulella ne ovat pienimmät. Pohjoistuulen MAE on 1,71 ja RMSE on 2,15, kun taas etelätuulen vastaavat luvut ovat 1,25 ja 1,61. Pohjoistuulen ME on 1,03, etelätuulen vastaava luku on 0,19. Aineiston määrä on suurin etelätuulella (718 havaintopistettä) ja pienin itätuulella (182 havaintopistettä).

Tuulennopeusluokat taulukon 6 mukaan vaikuttaa myös vir-



**Kuva 26:** Majakkatuulen nopeuden vertailu skatterometrituuleen Nahkaisessa. Kuvien elementit ovat samat kuin kuvassa 25.

**Taulukko 6:** Nahkaisen tuulen nopeuden tilastot kootusti.

	VUODENAIKA				TUULENSUUNTA				TUULENNOPEUS			
	Vuosi	Kevät	Kesä	Syysy	Pohj.	Itä	Etelä	Länsi	Heikko	Kohtal.	Navakka	Kova
MAE	1.34	1.55	1.46	1.18	1.71	1.2	1.25	1.27	1.73	1.12	1.49	1.87
RMSE	1.73	2.01	1.85	1.54	2.15	1.54	1.61	1.65	2.3	1.44	1.88	2.3
ME	0.58	1	0.76	0.32	1.03	0.41	0.19	0.8	-1.71	0.36	1.04	1.53
Aineiston määrä	1917	2644	737	916	377	182	718	640	104	947	765	101

heisiin ja harhaan. Taulukosta nähdään, että sekä kovalla että heikolla tuulella virhearvot ja harha ovat muita luokkia suurempia. Kovan tuulen MAE on 1,87 ja RMSE on 2,30 sekä heikolla tuulella arvot lähes samat. Kohtalaisella tuulella vastaavat arvot ovat 1,12 ja 1,44. Kovan tuulen ME on 1,53 ja heikon tuulen -1,71, kun taas kohtalaisen tuulen vastaava luku on 0,36. Jälleen heikon tuulen negatiivinen harha poikkeaa muista taulukon tilastoista, mutta aineisto on jälleen suppea. Aineiston määrä on suurin kohtalaisella ja navakalla tuulella (947 ja 765 havaintopistettä) ja pienin kovalla ja heikolla tuulella (101 ja 104 havaintopistettä).

## Kristiinankaupunki

Kristiinankaupungin majakan tuulennopeuden hajontakuvaajat ovat hyvin samankaltaiset Nahkiaisen vastaavien tulosten kanssa. Kristiinankaupungin tuloksiin sovitettut suorat vastaavat hieman paremmin  $x = y$  -suoraa verrattuna Nahkiaiseen. Kristiinankaupungin hajontakuvaajat ovat löydettävissä liitteessä A. Koko havaintojakson (maalis-joulukuu) pisteiden välille sovitettun suoran kulmakerroin on 0,948 ja y-akselin leikkauspiste on 0,503. Syksyllä tuulennopeuden vaikutus tuloksiin on pienin kaikista aineiston vuodenaajoista, eli sovitettun suoran kulmakerroin on kaikista lähinnä lukuarvoa 1.

**Taulukko 7:** Kristiinankaupungin tuulen nopeuden tilastot kootusti.

	VUODENAIKA				TUULENSUUNTA				TUULENNOPEUS			
	Vuosi	Kevät	Kesä	Syky	Pohj.	Itä	Etelä	Länsi	Heikko	Kohtal.	Navakka	Kova
MAE	1.34	1.36	1.49	1.23	1.69	1.67	1.31	1.12	3.15	1.14	1.31	1.25
RMSE	1.79	1.72	2.05	1.65	2.2	2.12	1.75	1.5	3.96	1.46	1.63	1.58
ME	0.1	0.38	0.27	-0.21	-0.02	-1.26	0.41	0.02	-3.15	-0.06	0.63	1.11
Aineiston määrä	1774	485	520	769	318	122	770	564	111	823	752	88

Kristiinankaupungin tilastot poikkeavat kaikista eniten aineiston majakoiden tilastoista. Kristiinankaupungin tilastojen perusteella (taulukko 7) tuulensuunnan vaikutus tuloksiin ei ole selvä. Länsituuli on taulukon perusteella kaikista paras tuulensuunta, jos virheet ja harha ovat indikaattoreina. Suurimmat virheet löytyvät tuulensuunnan ollen pohjoisesta, mutta suurin harha on itätuulella. Länsituulen MAE on 1,12 ja RMSE on 1,50, kun taas pohjoistuulen vastaavat luvut ovat 1,69 ja 2,20. Länsituulen ME on 0,02 ja itätuulen vastaava luku on -1,26. Aineiston määrä on suurin etelätuulella (770 havaintopistettä) ja pienin itätuulella (122 havaintopistettä).

Tuulennopeudella on taulukon 7 mukaan jonkin verran vaikutusta virheisiin ja harhaan. Taulukon mukaan sekä kovalla että heikolla tuulella virhearvot ja harha ovat muita luokkia suurempia, kun taas kohtalaisella tuulella ne ovat muita luokkia pienempiä. Heikon tuulen MAE on 3,15 ja RMSE on 3,96, kun taas kohtalaisen tuulen vastaavat arvot ovat 1,14 ja 1,46. Heikon tuulen ME on -3,15 ja kohtalaisen tuulen -0,06. Suurimmat virheet ja poikkeamat ovat tuulennopeusluokilla, joissa aineistoa on määrällisesti vähiten; aineiston määrä on pienin sekä kovalla että heikolla tuulella (88 ja 111 havaintopistettä) ja suurin sekä kohtalaisella että navakalla tuulella (823 ja 752 havaintopistettä).

## **Kalbådagrund**

Kalbådagrundin majakan tuulennopeuden hajontakuvaajat ovat samankaltaiset Kemin vastaavien kanssa. Kalbådagrundin kuvaajat ovat tosin enemmän hajallaan verrattuna Kemiin. Kalbådagrundin hajontakuvaajat ovat löydettävissä liitteessä A. Koko havaintojakson

(maalis–joulukuu) pisteiden välille sovitettun suoran kulmakerroin on 1,080 ja y-akselin leikkauspiste on 0,253. Sovitettujen suorien kulmakertoimet ovat pääosin lähellä lukuarvoa 1, vaikka pisteitä onkin hajanaisesti suorien ympärillä.

Vuodenaikojen välinen ero hajontakuvaajissa ei ole suuri. Lähinnä syksyllä tuulennopeuden vaikutus tuloksiin on kaikista suurin, jolloin pienten tuulennopeuksien arvot vastaavat skatterometri-tuulta paremmin kuin suurten tuulennopeuksien. Kaikista majakoista Kalbådagrundin tuloksissa voidaan olettaa olevan suurin epävarmuus, sillä aineiston määrä on kaikista vähäisin.

Taulukon 8 tilastojen mukaan tuulensuunnan ollen idästä Kalbådagrundin virheet ja harha ovat suurimmillaan. Sen sijaan länsituulella virheet ovat pienimmillään ja pohjoistuulella harha on pienin. Itätuulen MAE on 1,67 ja RMSE on 2,02, kun taas länsituulen MAE on 1,32 ja RMSE 1,67. ME on itätuulella 1,13 ja pohjoistuulella 0,17. Aineiston määrä on suurin länsituulella (583 havaintopistettä) ja pienin pohjoistuulella (77 havaintopistettä).

Mikäli aineisto jaetaan tuulennopeuksittain, huomataan, että kovalla ja heikolla tuulella virheet ja harha ovat suurimmillaan, kohtalaisella tuulella ne ovat pienimmillään. Kovan tuulen MAE on 2,20 ja RMSE on 2,51 sekä heikon tuulen vastaavat arvot ovat 1,96 ja 2,39.

**Taulukko 8:** Kalbådagrundin tuulen nopeuden tilastot kootusti.

	VUODENAIKA				TUULENSUUNTA				TUULENNOPEUS			
	Vuosi	Kevät	Kesä	Syksy	Pohj.	Itä	Etelä	Länsi	Heikko	Kohtal.	Navakka	Kova
<b>MAE</b>	1.41	1.52	1.48	1.22	1.55	1.67	1.4	1.32	1.96	1.05	1.57	2.2
<b>RMSE</b>	1.78	1.88	1.85	1.55	2	2.02	1.7	1.67	2.39	1.37	1.89	2.51
<b>ME</b>	0.85	0.97	0.86	0.72	0.17	1.13	0.7	0.89	-1.95	0.39	1.45	2.2
Aineiston määrä	1018	301	404	313	77	189	169	583	60	424	475	59

Kohtalaisella tuulella vastaavat arvot ovat 1,05 ja 1,37. Suurimmat ME:n arvot ovat kovalla tuulella 2,20 ja heikolla tuulella -1,95, kun taas pienin arvo 0,39 on kohtalaisella tuulella.

## 5.2 Tuulen suunta

Tuulensuunnan tulokset sisältävät yleisesti enemmän hajontaa ja virheitä verrattuna tuulennopeuden tuloksiin. Tuulensuunnan tulokset eivät siis ole yhtä selviä. Jokaiselle majakalle on piirretty tuulen u- ja v-komponenteittain hajontakuvaajat, joissa tuulensuunnan käyttäytyminen majakkatuulen ja skatterometrituulen välillä nähdään. Kuvaajia ei ole esitetty tässä, sillä ne eivät sisältäneet juurikaan lisätietoa tuulennopeuden hajontakuvaajien jälkeen. Hajontakuvaajat u- ja v-komponenteista ovat kuitenkin löydettävissä liitteestä A.

Taulukossa 9 on esitetty kaikkien neljän majakan tuulensuunnan tilastolliset luvut koko havaintojakson ajalta (maalis–joulukuu). Taulukossa näkyy virhettä mittaavat luvut MAE ja RMSE, sekä harhaa mittaava luku ME. Tilastolliset luvut ovat laskettu tuulensuunnan asteista ( $^{\circ}$ ).

Taulukosta nähdään, että virheet ovat varsin suuria harhaan verrattuna. Majakoista pienimmät virheet löytyvät Kemistä, jossa

**Taulukko 9:** Kaikkien neljän majakan tuulensuunnan tilastot koko havaintojakson ajalta.

	KEMI	NAHKIAINEN	KRISTIINAN- KAUPUNKI	KALBÄDAGRUND
MAE	7,75	12,58	13,9	12,97
RMSE	15,27	20,41	21,81	24,1
ME	-0,91	-2,26	-3,16	3,02
Aineiston määrä	2968	1917	1774	1018

MAE on 7,75 ja RMSE on 15,27. Vastaavasti suurimmat virheet löytyvät Kalbådagrundista, jossa MAE on 12,97 ja RMSE on 24,10. Kolmen majakan (Kemi, Nahkiainen ja Kristiinankaupunki) tuulensuunnan harha on negatiivinen vaihdellen -0,91 ja -3,16 välillä, kun taas Kalbådagrundin harha on positiivinen arvolla 3,02. Harhan lukuarvot kertovat siis sen, että Kemissä, Nahkiaisessa ja Kristiinankaupungissa majakkahavainto tuulensuunnasta on keskimäärin kääntynyt vastapäivään ja Kalbådagrundissa myötäpäivään. Myös tuulensuunnille lasketut keskiluvut (ei nähtävillä tässä) myötäilevät tätä tulosta. Tulos on yhtenevä myös tuuliruuksujen (kuvat 22 ja 23) kanssa kaikkien muiden majakoiden kohdalla paitsi Kalbådagrundin.

Vaikuttaa siltä, että tuulensuunnan poikkeamat ovat vaihdelleet voimakkaasti keskimääräisen molemmin puolin ja siksi keskivirhe on tasoittunut varsin lähelle nollaa. Tuulensuuntaan liittyvä harha on hyvin pieni siihen nähden, kuinka pieni merkitys muutaman asteen poikkeamalla on tuulensuuntaan, ja kuinka moninkertaisia virheluvut ovat harhaan nähden.

## 6 Johtopäätökset

Yleisesti voidaan todeta, että majakkatuulen nopeus on hieman 10 metrin pintatuulta voimakkaampi, mikä vastaa asetettua hypoteesia. Kemin tuulennopeuden tuloksissa näkyy selvä positiivinen harha, sen sijaan Kristiinankaupungissa ja Kalbådagrundissa tulokset ovat varsin hajanaisia ja epävarmoja.

Koko vuoden havaintojaksolla tuulennopeuden virheet ovat majakasta riippuen välillä 1,28–1,41 (MAE) ja 1,55–1,79 (RMSE). Harha (ME) asettuu välille 0,10–1,15. Tuloksista nähdään, että syyskuukausina majakkatuulen nopeus vastaa 10 metrin pintatuulta parhaiten ja vastaavasti kevätkuukausina huonoiten. Tulos saattaa johtua siitä, että syksyllä meri on usein lämpimämpi kuin ilma ja tuuli pääsee herkemmin pintaan. Keväällä tilanne on päinvastainen. Tämä vaikutus saattaa näkyä tuloksissa, vaikka selvästi stabiilit ja epästabiilit tilanteet ovatkin rajattu pois.

Tuulensuunnittain tarkasteltuna majakoiden tuulennopeuden tuloksissa ei nähdä mitään selvää suuntausta. Tulokset vaihtelevat majakkakohtaisesti. Pohjoistuulella ja itätuulella virheet ovat keskimäärin suurimpia, mutta myös aineistomäärät ovat keskimäärin pienemmät. Harhan suuruus näyttää olevan kytköksissä virheiden suuruuden kanssa, mutta tässä näkyy myös paljon vaihtelua.

Majakkahavaintoja tarkasteltaessa tuulennopeuksittain huomataan, että kohtalainen ja navakka tuuli edustavat todellista 10 metrin pintatuulta keskimäärin paremmin kuin heikko tai kova tuuli. Harhan suuruuden määräytymisessä tuulennopeuksien suhteen nähdään mielenkiintoinen ilmiö. Havaittu harha heikolle tuulelle



on negatiivinen, mutta harha näyttää kasvavan positiiviseen suuntaan mitä voimakkaampiin tuulennopeuksiin mennään. Eli heikolla tuulella majakan havainto pintatuulesta on pienempi kuin mitä se todellisuudessa on ja tuulen voimistuessa havainto kääntyykin yliarvioimaan todellista tuulta. Sama tulos toistuu jokaisen majakan kohdalla.

Tuulensuunnan käyttäytymisestä ei ole suurta varmuutta tämän tutkimuksen perusteella. Heikko signaali on havaittavissa siitä, että tuulen suunnan harha on keskimäärin negatiivinen, eli majakahavaintojen suunta on kääntynyt vastapäivään todellisesta tuulesta, mikä vastaa hypoteesia. Harhan suuruus, joka on enimmillään -3/3 luokkaa asteissa mitattuna, on käytännössä kuitenkin hyvin pieni harha tuulensuunnalle.

Majakoiden suuri keskinäinen ero tuloksissa hämmästyttää, mutta se selittynee ainakin osittain majakoiden maksimietäisyysvaatimuksilla. Kemissä ja Nahkiasessa vertailukohtana käytettyä skatterometrituulta otettiin maksimissaan 15 ja 40 kilometrin etäisyydeltä, kun taas Kristiinankaupungissa ja Kalbådagrundissa vastaava oli 70 kilometriä. Tällöin vertailukohtana käytetty skatterometrituuli vastasi huonommin todellista tuulta majakan lähistöllä ja saadut tulokset olivat siten hatarammat.

Tuulimittareiden sijoittelulla majakan katolla saattaa olla myös vaikutuksensa tuloksiin, vaikka majakoiden välinen ero ei sillä selitykään. Kemissä, Kristiinankaupungissa ja Kalbådagrundissa tuulimittari(t) ovat sijoitettu helikopteritason suojaverkon lounaispuolelle, Nahkiasessa mittarit ovat koillisen ja luoteen puolella. Kristiinankaupungissa mittari on kaikista lähimpänä helikopterialus-

taa ollen noin 0,5 metrin korkeudella, kun taas Kalbådagrundissa mittari on 2,5 metriä alustan yläpuolella. Majakoiden tulokset olisivat paremmin verrattavissa keskenään, mikäli jokaisen majakan tuulimittarit olisi yhtenevästi asennettu.

## 7 Yhteenveto

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kuinka hyvin merelliset majakkahavainnot edustavat pinnassa 10 metrin korkeudella vallitsevaa tuulta. Merellisiä majakoita edustivat Kemin, Nahkiaisen, Kristiinan-kaupungin ja Kalbådagrudin majakat. Työssä rajattiin noin viiden vuoden tarkastelujakso vuosien 2012–2017 väliltä, jonka ajalta kerättiin sekä majakoiden tuulihavaintoja että niitä vastaavia ASCAT skatterometrituulihavaintoja. Havaintoja kertyi jokaista majakkaa kohden noin 1000–3000. Vertailtavat havainnot rajattiin kattamaan stabiilisuudeltaan neutraalit tilanteet. Majakkahavainnoista tuulen nopeudelle ja suunnalle laskettiin harha ja virhetilastoja siten, että skatterometrituuli oli vertailukohtana. Tutkimuksessa tarkasteltiin vielä erikseen vaikuttaako vuodenaika, tuulen nopeus tai suunta tuloksiin.

Majakkatuulen nopeudella on tämän tutkimuksen perusteella maltillinen positiivinen harha verrattuna 10 metrin pintatuuleen. Syksyllä majakassa havaittu tuuli edustaa 10 metrin pintatuulta hiukan paremmin kuin keväällä. Tulos selittyy vuodenajalle tyypillisellä ilmakehän hydrostaattisella stabiilisuudella. Tuulennopeuden ollessa kohtalainen tai navakka havainto edustaa pintatuulta paremmin kuin jos tuulennopeus on heikko tai kova. Heikolla tuulella majakkahavainto aliarvioi 10 metrin korkeudella vallitsevaa tuulta, mutta tuulennopeuden kasvaessa kohtalaiseksi tai siitä ylöspäin majakkahavainto yliarvioi pintatuulta. Tuulensuunta näyttää kääntyvän majakassa hieman vastapäivään pintatuulen suunnasta, mutta tulos on tämän tutkimuksen perusteella hyvin epävarma ja lisätutkimuksia tarvitaan.

Jatkossa tutkittaessa majakoiden tuulihavaintojen vastaavuut-

ta 10 metrin pintatuuleen tarvitaan lisää majakkapisteitä mukaan tutkimukseen. Tämä tarkoittaa sitä, että jos Ilmatieteen laitoksen merellisiä tuulihavaintoja tutkitaan, niin majakkapisteitä täytyy ottaa myös lähempää rannikkoa. Tällöin ASCAT tuulituotteilla ei voida verifioida tuulta, sillä skatterometrihavainto jää liian kauaksi majakkahavainnosta. Tuulennopeuden vaikutuksesta tuloksiin saatiin tässä tutkimuksessa mielenkiintoisia havaintoja, mutta aihe vaatii lisää tutkimusta. Tuulennopeus tulee jakaa vielä useampaan luokkaan ja aineistoa tarvitaan enemmän etenkin heikkojen ja kovien tuulennopeuksien suhteen. Lisäksi tuulensuunnan käyttäytymiselle tarvitaan lisää tutkimusta, sillä tässä saadut tulokset ovat varsin epävarmoja ja vaihtelevia.

# Kiitokset

Ensinnäkin, haluan kiittää Ilmatieteen laitoksen Sään ja ilmastonmuutoksen vaikutustutkimus -yksikköä työni rahoituksesta. Erityiskiitos ohjaajilleni Hilppa Gregowille ja Teresa Valkoselle, jotka olivat tukena sekä myötä- että vastatulessa. Kiitän myös kollegoitani Ilmatieteen laitoksella teknisestä tuesta aineiston hakemisen ja käsittelyn kanssa.

Kiitos Alankomaiden Meteorologisen laitoksen (KNMI) skatterometriimille arvokkaista neuvoista liittyen tuulen havainnointiin skatterometreillä. He olivat aina valmiita auttamaan ja neuvomaan. EUMETSAT, KNMI, Ilmatieteen laitos ja ECMWF tarjosivat ystävällisesti aineiston käyttööni.

Lisäksi kiitos puolisolleni Eero Ajosenpäälle, siskolleni Ruhama Hovestadtille sekä perheelleni kotona antamasta tuesta ja kannustuksesta koko gradutyön ajan. Haluan myös kiittää opiskelijaystäviäni, joiden kanssa lounaalla sain päivittäin jakaa sekä onnistumiset että vaikeudet työhöni liittyen.

# Viitteet

- Copernicus Climate Change Service (2018), URL: <http://climate.copernicus.eu/products/climate-reanalysis> (viitattu 12.01.2018).
- EUMETSAT (2015): *ASCAT Product Guide*, 5. painos.
- EUMeTrain (2017): *Tutorial on Satellite Derived Wind Products*, URL: <http://www.eumetrain.org/data/4/438/navmenu.php?tab=2&page=3.0.0> (viitattu 07.02.2018).
- Frisk, M. (2004): *Sää- ja meritieto : vesilläliikkujan käsikirja*, [Helsinki]: Ilmatieteen laitos : Merentutkimuslaitos.
- Frisk, M. (2017), Ilmatieteen laitos, Havaintopalvelut. Henkilökohtainen yhteydenotto.
- Hersbach, H. (2017): *ERA5: the new reanalysis of weather and climate data*, [ECMWF Tiedeblogi], URL: <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/science-blog/2017/era5-new-reanalysis-weather-and-climate-data> (viitattu 03.01.2018).
- Hersbach, H. ja D. Dee (2016): *ERA5 reanalysis is in production*, [ECMWF Uutiskirje], URL: <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production> (viitattu 03.01.2018).
- Holton, J. R ja G. J. Hakim (2013): *An Introduction to Dynamic meteorology*, 5th, Oxford: Elsevier.
- Ilmatieteen laitos (2017a): *Automaattinen sääasema*, URL: <http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc/Automaattinen%20s%C3%A4asema> (viitattu 26.10.2017).

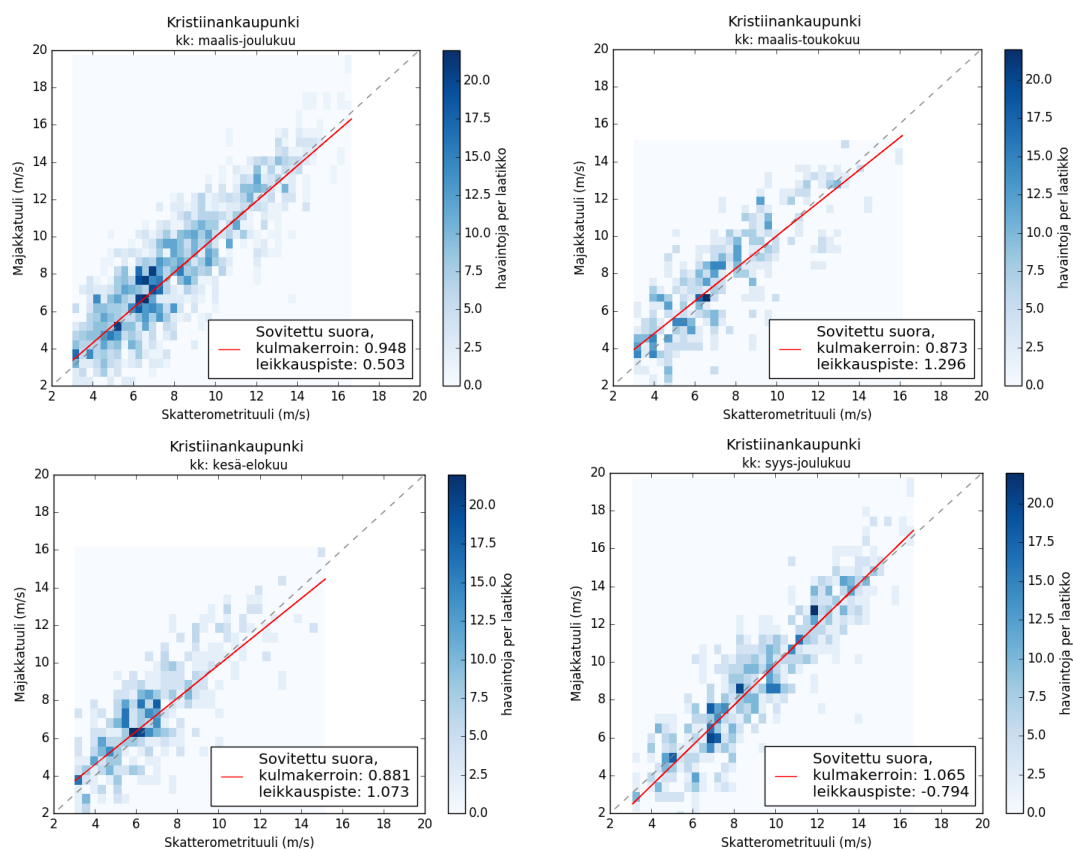
- Ilmatieteen laitos (2017b): *Havaintosuureet: mitä havainnoimme?*, URL: <http://ilmatieteenlaitos.fi/havaintosuureet#tuuli> (viitattu 25.10.2017).
- (2017c): *Havaintotietokanta*.
- (2017d): *Ilmatieteen laitoksen havaintoasemat*, URL: <http://ilmatieteenlaitos.fi/havaintoasemat> (viitattu 25.10.2017).
- (2017e): *Miten säätä havainnoidaan Ilmatieteen laitoksessa?*, URL: <http://ilmatieteenlaitos.fi/saahavainnot> (viitattu 25.10.2017).
- (2018a): *Anemometri*, URL: <http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc/Anemometri> (viitattu 05.02.2018).
- (2018b): *Tuulet ja myrskyt*, URL: <http://ilmatieteenlaitos.fi/tuulet> (viitattu 28.01.2018).
- Karttunen, H. (2008): *Ilmakehä, sää ja ilmasto*, Helsingissä [Helsinki]: Tähtitieteellinen yhdistys Ursa.
- Laurell, S., G. Bergström, J. Grönlund, P. Hynes, P. Mickwitz ja E. Rimpiläinen (1999): *Suomen majakat: Finska fyrar = Finnish lighthouses*, Helsinki: Nemo : Merenkulkulaitos.
- Movable Type (2018): *Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points*, URL: <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html> (viitattu 29.01.2018).
- OSI SAF (2016): *ASCAT wind products user manual*, versio 1.14, URL: [http://projects.knmi.nl/scatterometer/publications/pdf/ASCAT\\_Product\\_Manual.pdf](http://projects.knmi.nl/scatterometer/publications/pdf/ASCAT_Product_Manual.pdf).
- Portabella, M., W. Lin, A. Stoffelen, A. Verhoef ja A. Turiel (2014): *ASCAT Quality Control near Rain*, EUMETSAT OSI SAF.

- Puhakka, T. (1996): *Dynamiikka I, Ilmakehän termodynamiikka*, Opintomoniste, Helsingin yliopisto, Meteorologian laitos.
- Stoffelen, A. (1998): "Scatterometry", Universiteit Utrecht.
- Suomi, I. (2017): "Wind gusts in the atmospheric boundary layer", Helsingin yliopisto.
- Verhoef, A. ja A. Stoffelen (2013): *Validation of ASCAT 12.5-km winds*, versio 1.3, EUMETSAT.
- (2017): *Algorithm Theoretical Basis Document for the OSI SAF wind products version 1.4*, EUMETSAT.
- Verhoef, A., M. Portabella ja A. Stoffelen (2012): "High-Resolution ASCAT Scatterometer Winds Near the Coast", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **50** (7), 2481–2487.
- Verspeek, J., A. Stoffelen, A. Verhoef ja M. Portabella (2012): "Improved ASCAT Wind Retrieval Using NWP Ocean Calibration", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **50** (7), 2488–2494.
- W. T. Liu K. B. Katsaros, J. A. Businger (1979): "Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints in the interface", *J. Atmos. Sci.* **36**, 1722–1735.
- Wilks, D. S. (1995): *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction*, San Diego : Academic Press.

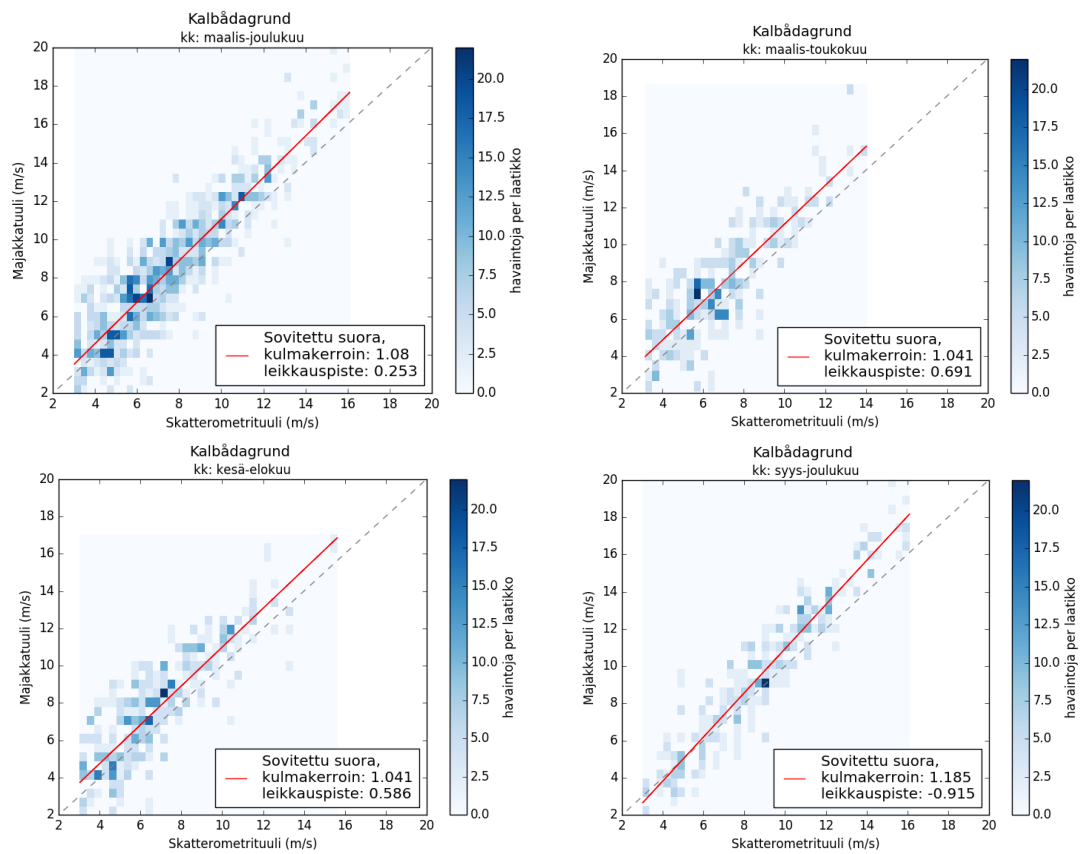




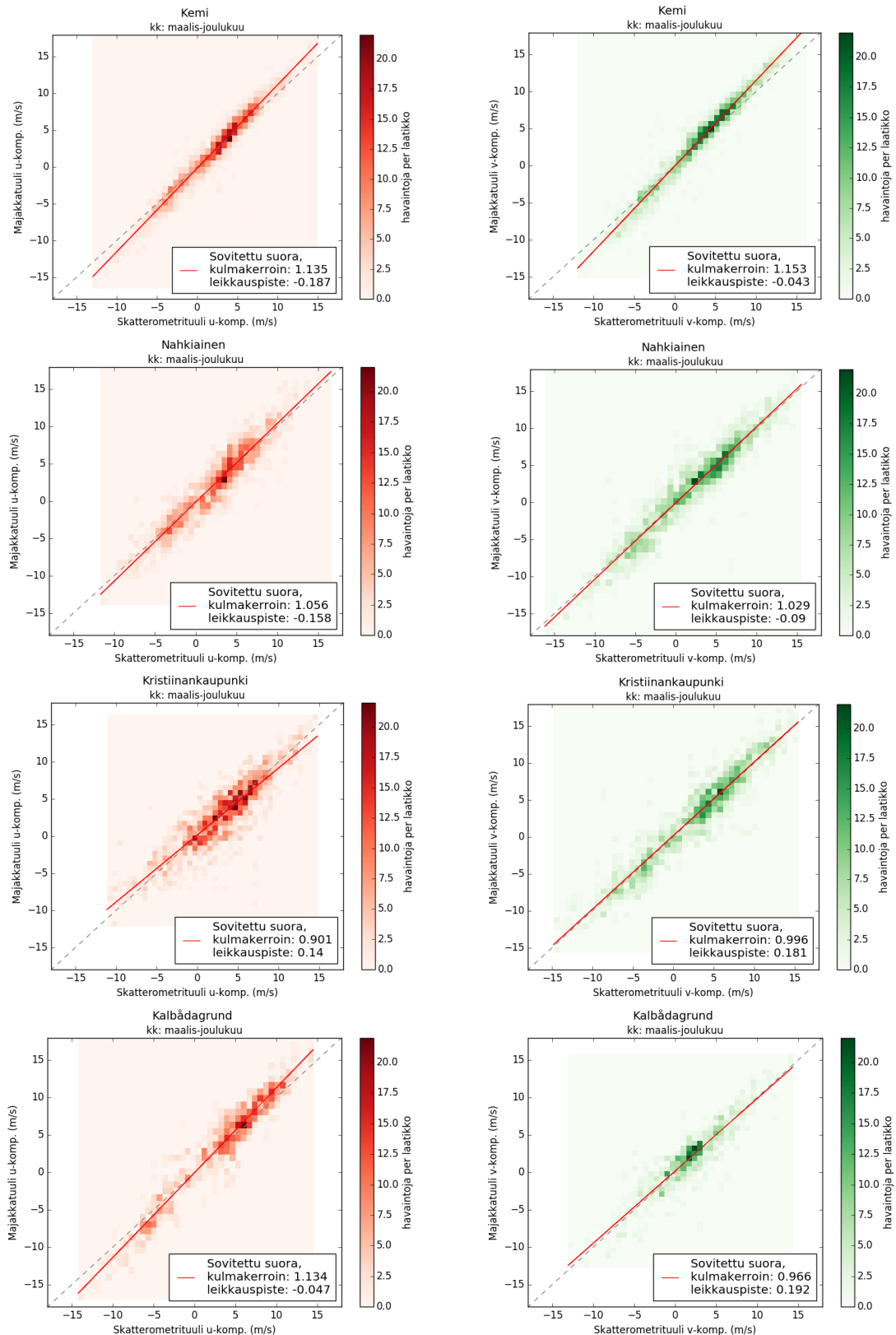
# A Kuvat tuloksista



*Majakkatuulen nopeuden vertailu skatterometrituuleen Kristiinankaupungissa. Kuvien elementit ovat samat kuin kuvassa 25.*



*Majakkatuulen nopeuden vertailu skatterometrituuleen Kalbådagrundissa. Kuvien elementit ovat samat kuin kuvassa 25.*



*Majakkatuulen u- ja v-komponenttien vertailu skatterometrituuleen koko havaintosarjan aikana kaikista majakoista. Punaisen (u-komponentti) ja vihreän (v-komponentti) sävyiset laatikot edustavat havaintopisteitä; mitä tummempi sävy, sen enemmän havaintoja. Punainen viiva on sovitettu suora havaintopisteiden välille. Harmaa katkoviiva esittää  $x = y$  -suoraa.*

## B Listaus virallisista tuulimittareista

Niissä majakoissa, joissa on käytössä kaksoistuulimittarit, toinen mittari on aina virallinen mittari. Tässä on listattuna viralliset mittarit aineiston majakoista havaintoajalta 12/2012–10/2017.

### Kemi

01/12/2012–17/11/2016	#1
17/11/2016–29/12/2016	#2
29/12/2016–31/10/2017	#1

### Nahkiainen

01/12/2012–19/06/2017	#1
19/06/2017–15/08/2017	#2
15/08/2017–31/10/2017	#1

### Kristiinankaupunki ja Kalbådagrund

Asemilla on vain #1-mittarit, eli ne ovat viralliset mittarit.